



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

도시계획학박사학위논문

고속도로 통행시간 신뢰성 지표
추정 모형 개발

2019년 8월

서울대학교 대학원

환경계획학과

박 찬 운

고속도로 통행시간 신뢰성 지표
추정 모형 개발

지도교수 김 성 수

이 논문을 도시계획학박사 학위논문으로 제출함
2019년 4월

서울대학교 대학원
환경계획학과 교통학전공
박 찬 운

박찬운의 박사학위 논문을 인준함
2019년 7월

위 원 장 _____(인)

부위원장 _____(인)

위 원 _____(인)

위 원 _____(인)

위 원 _____(인)

국 문 초 록

통행시간 신뢰성은 계획한 통행시간 대비 실제 통행한 통행시간과의 차이를 말한다. 즉, 통행시간 신뢰성은 통행자가 원하는 도착시간에 정확하게 목적지에 도달할 수 있는가를 나타내는 개념으로, 통행시간 가변성, 변동성, 불확실성 등을 내포한다.

통행시간 신뢰성과 관련한 연구를 살펴보면 추상적인 개념의 통행시간 신뢰성을 명확하게 표현할 수 있도록 통행시간 신뢰성 지표를 이용한다. 즉, 통행시간 신뢰성 지표는 통행시간 신뢰성을 개념적으로 포함하면서, 계량화하여 수치로 보여주는 것이다. 즉, 통행시간 신뢰성 지표는 주어진 교통상황 하에서 목적지까지 이동하는데 통행시간의 변동분을 설명한다.

통행시간 신뢰성 지표를 연구하기 위해서 개별 통행자들의 통행행태 자료가 필수적이다. 그러나 이러한 자료가 부족하여 연구가 활발히 이루어지지 않았다. 하지만 최근 빅데이터 개념이 등장하면서 분석할 수 있는 다양한 자료들이 제공되고 있다. 본 연구는 개별통행자들의 통행행태 자료를 이용하여 통행시간 신뢰성 지표 산정모형에 주안점을 두어 분석하였다. 그 동안은 해외를 중심으로 통행시간 신뢰성에 대한 연구가 진행되었으며, 통행시간 신뢰성 지표에 대한 다양한 값들이 제시되었다. 그리고 최근에 통행시간 신뢰성 지표로 표준편차를 중점적으로 고려하기 시작하였다. 이러한 학계 연구 동향에 맞추어 통행시간 표준편차 모형을 구축하여 통행시간 신뢰성을 추정하였다. 그리고 우리나라 자료를 이용한 우리나라 운전자들의 통행특성을 반영한 통행시간 신뢰성 지표 산정모형을 개발하였다.

먼저, 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 구축을 위해서 통행시간 신뢰성 지표와 지표를 설명할 수 있는 변수를 살펴본다. 그리고 통행시간 신뢰성 지표와 설명변수의 관계를 살펴보고 유의미한 변수를 파악한다. 통행시간 신뢰성 지표 설명변수와 통행시간 표준편차의 최적 관계식을 파악

한 후 통행시간 신뢰성 지표 산정모형을 구축한다. 실증자료를 통해서 통행시간 신뢰성 지표 추정모형 검증을 통해서 최적 모형을 제시하였다. 통행시간 신뢰성 추정 모형 구축에 이용한 자료는 집계된 자료가 아닌 개별 차량의 속도를 파악할 수 있는 자료이다. 개별 차량 한 대의 통행속도를 이용하여 링크의 평균통행시간, 통행시간 표준편차 등을 산정하고 이를 바탕으로 통행시간 신뢰성 지표 산정모형을 구축하였다. 그리고 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 개발에 추가하여 새로이 추가될 수 있는 독립변수를 검토하였다. 독립변수는 통행시간 신뢰성에 영향을 줄 수 있는 변수들로 기존의 연구에서는 반영하지 못한 변수들이다. 새로이 추가된 독립변수를 모형에 반영하여 본 연구에서 제시하는 통행시간 신뢰성 지표 산정모형을 제시하였다.

통행시간 신뢰성 지표 산정을 위해서 선행연구를 고찰하고, 통행시간 신뢰성 지표로 표준편차를 산정하는 모형을 구축하였다. MD(Mean Delay)와 링크길이, 중차량 비율, 차로수를 독립변수로 하여 통행시간 신뢰성 지표 산정모형을 제시하였다. 다양한 형태의 통행시간 신뢰성 추정모형을 검토하였으며, 2차 함수 형태의 모형을 최적 모형으로 제시하였다. 적합한 통행시간 신뢰성 지표 추정모형 구축을 위하여 View-T 1.0의 개별통행행태자료를 이용하였으며, 우리나라 대표고속도로 구간 8개를 대상으로 하여 분석하였다. 2차함수 형태의 통행시간 신뢰성 추정모형을 구축한 후 차로수에 따라서 개별 파라미터에 대한 추정하였다. 차로수를 통행시간 신뢰성 지표 산정모형의 독립변수로 이용하는 것은 의미 있지만 어떠한 형태로 반영하는지가 관건이었다. 검토결과 단방향 2차로, 3차로, 4차로 이상으로 구분하여 각각 모형을 구축하는 것이 적합한 것으로 판단하였다. 이는 차로수에 따라서 도로가 각기 다른 특성을 가지고 있기 때문으로 판단하였다.

본 연구는 통행시간 신뢰성 지표 추정모형을 구축하고 이를 바탕으로 통행시간 신뢰성 비용을 산정하였다. 통행시간 신뢰성 가치는 신뢰성 비율(Reliability Ratio)을 이용하여 산정하였으며, 국토해양부(2009)에서 제

시한 0.8을 이용하였다. 통행시간 신뢰성 비용추정결과 도로가 혼잡할수록 개인평균비용에서 차지하는 비율이 상승하는 것으로 분석되었다. 도로가 혼잡할수록 통행시간 비용과 통행시간 신뢰성 비용은 다른 비용보다 더 높게 상승하며, 통행시간 신뢰성 비용은 사회적 관점에서 살펴보면 개인이 지불하는 비용보다 더 많은 비용을 지불하고 있는 것으로 산정되었다.

본 연구가 제시하는 통행시간 신뢰성 지표 추정모형을 통하여 도로 이용자들의 통행시간 신뢰성을 더 정확하게 살펴볼 수 있었다. 그리고 이 모형을 통하여 연속류 도로의 통행시간 신뢰성 추정에 적용이 가능하다. 더 나아가 도로 운영 평가지표, 도로 통행시간 신뢰성 편익 추정에 본 연구에서 구축한 모형을 이용할 수 있을 것이다.

주요어 : 통행시간 신뢰성, 통행시간 표준편차, 평균지체(Mean Delay), 2차 함수 모형, 통행시간 신뢰성 지표
학 번 : 2015-31309

목 차

제1장 서론	1
제1절 연구의 배경 및 목적	1
제2절 연구의 내용	2
제3절 연구의 수행체계	3
 제2장 이론 및 선행연구 고찰	4
제1절 이론적 배경	4
1. 통행시간 신뢰성의 개념	4
2. 통행시간 신뢰성의 비용	6
제2절 선행연구 고찰	8
1. 통행시간 신뢰성 지표	8
2. 통행시간 신뢰성 가치	20
제3절 기존연구 시사점 및 본 연구의 기여도	25
1. 기존연구 시사점	25
2. 본 연구의 기여도	26
 제3장 분석방법론	27
제1절 통행시간 신뢰성 추정 모형	27
제2절 통행시간 신뢰성 추정 모형: 비교모형	28
제3절 통행시간 신뢰성 지표 모형 검증 방법	30
 제4장 분석자료	31
제1절 자료의 선정	31
1. 통행시간 신뢰성 지표 선정	31
2. 분석 대상구간	33
제2절 분석 자료의 구축방법	34

1. 통행시간 신뢰성 지표 산정	34
2. 통행시간 신뢰성 가치 산정	37
제3절 분석 자료의 구축 결과 및 검토	39
1. 통행시간 및 통행시간 표준편차 관련성 검토	39
2. 신뢰성 기준속도	40
제5장 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 개발	43
제1절 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 개발 개요	43
1. 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 개발 과정	43
2. 통행시간 신뢰성 지표 및 설명변수 검토	44
제2절 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 구축	45
1. 통행시간 신뢰성 지표와 독립변수 관계 검토	45
2. 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 기본식	48
3. 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 구축결과	53
제3절 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 검증	60
1. 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 검증	60
2. 실측자료 산포도와 모형결과 비교	62
제4절 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 검토	71
1. 중차량 비율에 따른 통행시간 신뢰성 지표 산정 모형 검토	71
2. 차로수에 따른 통행시간 신뢰성 지표 산정 모형 검토	73
3. 통행시간 신뢰성 지표 검토	81
4. 공간 이전성 및 시간 이전성 검토	87
제6장 통행시간 신뢰성 비용 산정	111
제1절 통행비용 산정 개요	111
1. 통행비용 산정 원리	111
2. 통행비용 항목	114
3. 통행시간 신뢰성 비용 산정 방법	115
제2절 통행시간 신뢰성 비용 산정 방법 및 자료	116

1. 통행비용 산정 방법	116
2. 통행비용 산정 자료	122
제3절 통행비용 추정 결과	126
1. 남부구간	126
2. 북부구간	127
제4절 통행시간 신뢰성 비용 추정 결과 검토	128
1. 통행시간 신뢰성 비용 비율	128
2. 다차종 반영	130
 제7장 결론	 133
제1절 연구결과 요약	133
1. 통행시간 신뢰성 지표 산정 모형	133
2. 통행시간 신뢰성 비용	135
제2절 연구의 한계 및 향후 연구방향	136
1. 연구의 한계	136
2. 향후 연구방향	138
 참고문헌	 140
 부록	 146
1. 고속도로 별 통행관련 기초자료 분석	146
2. 단위거리당 통행시간 표준편차	154

표 목차

<표 2-1> 도로유형별 지표추정 결과	9
<표 2-2> 도로위계-LOS에 따른 Buffer Time 산정 결과.....	10
<표 2-3> V/C에 따른 통행시간 표준편차.....	11
<표 2-4> V/C에 따른 표준편차 추정식.....	11
<표 2-5> 유료도로/무료도로 표준편차 추정 결과	12
<표 2-6> 도로 통행시간 신뢰성 지표.....	13
<표 2-7> 각 국가의 통행시간 신뢰성 지표 산정 모형.....	14
<표 2-8> 표준편차를 이용한 신뢰성 추정 모형.....	16
<표 2-9> 통행시간 신뢰성 지표	17
<표 2-10> 통행시간 신뢰성 지표 관련 선행연구 종합.....	19
<표 2-11> 통행시간 신뢰성 추정결과(장수은, 강지혜, 2008).....	20
<표 2-12> RR 및 통행시간 신뢰성 추정 결과(한국도로공사, 2013) ..	21
<표 2-13> 선택실험법을 통한 RR 분석 결과 (한국교통연구원, 2016)·	21
<표 2-14> 경로선택모형을 통한 RR 추정결과 (최영은, 2017).....	22
<표 2-15> 통행시간 신뢰성 비율 정리: 승용차, 화물차(de Jong, 2015)··	23
<표 2-16> 신뢰성 가치산정 선행연구 고찰 종합.....	24
<표 4-1> View-T 1.0 속도프로파일 자료 예시	32
<표 4-2> 고속도로 대표구간 연장 및 개통일.....	33
<표 4-3> 전체 자료 중 $\mu \pm X\sigma$ 가 차지하는 비율	36
<표 4-4> 신뢰성비율 산정 결과 종합.....	37
<표 4-5> 통행시간 신뢰성가치(2018년).....	38
<표 4-6> 서울외곽순환 고속도로 평균통행시간, 통행시간 표준편차 ·	39
<표 4-7> 교통수요 분석에 이용되는 초기속도.....	40
<표 4-8> 서울외곽순환고속도로 누적%별 통행속도	41
<표 4-9> 시간대별 평균 통행속도(대표고속도로 전체자료).....	42

<표 5-1> 통행시간 표준편차와 독립변수 상관계수.....	45
<표 5-2> 통행시간 표준편차와 설명변수 상관계수: 로그변환 후.....	47
<표 5-3> 통행시간 표준편차(SD)와 MD 관계식 요약.....	48
<표 5-4> 통행시간 표준편차(SD)와 링크길이 관계식 요약.....	49
<표 5-5> 1차 선형함수-A모형 계수 추정결과 및 결정계수.....	53
<표 5-6> 2차함수-A모형 계수 추정결과 및 결정계수.....	54
<표 5-7> Power함수모형 계수 추정결과 및 결정계수.....	55
<표 5-8> Power함수모형 계수 추정결과 및 결정계수.....	56
<표 5-9> 영국모형식 계수 추정결과 및 결정계수.....	57
<표 5-10> 독일모형식 계수 추정결과 및 결정계수.....	58
<표 5-11> Kouwenhoven모형식 계수 추정결과 및 결정계수.....	59
<표 5-12> 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 검증 결과-1	60
<표 5-13> 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 검증 결과-2	61
<표 5-14> 장거리 링크에 대한 파라미터 재추정	67
<표 5-15> 시간에 따른 중차량 비율.....	71
<표 5-16> 고속도로에 따른 중차량 비율.....	71
<표 5-17> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 중차량 비율	72
<표 5-18> 차로수에 따른 기초통계 분석.....	73
<표 5-19> 차로수에 따른 분포지역	74
<표 5-20> Chow test 결과(Group 설정: 차로수).....	75
<표 5-21> 2차로와 3차로 이상 도로 정규성 검정(Kolmogorov-Smirnov) ...	76
<표 5-22> 2차로와 3차로, 4차로 이상 도로에 대한 비모수검정 결과·	76
<표 5-23> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 차로수 반영·	77
<표 5-24> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 차로수 구분1·	78
<표 5-25> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 차로수 구분2·	79
<표 5-26> 통행시간 신뢰성 지표 추정 모형 계수 분석결과 및 신뢰수준..	80
<표 5-27> 영국모형식 계수 추정결과 및 결정계수.....	82
<표 5-28> 영국모형식 계수 추정결과 및 결정계수.....	83
<표 5-29> 단위거리당 통행시간 표준편차와 독립변수 상관계수.....	84

<표 5-30> 통행시간 신뢰성 지표 모형 파라미터 추정결과: 수정표준편차 ...	86
<표 5-31> 통행관련 기초자료 분석결과: 침두	88
<표 5-32> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 침두 ...	89
<표 5-33> 통행관련 기초자료 분석결과: 비침두	90
<표 5-34> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 비침두 ..	91
<표 5-35> 통행관련 기초자료 분석결과: 심야	92
<표 5-36> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 심야 ...	93
<표 5-37> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 심야 ...	94
<표 5-38> 통행관련 기초자료 분석결과: 경부	95
<표 5-39> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 경부 ·	96
<표 5-40> 통행관련 기초자료 분석결과: 경인	97
<표 5-41> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 경인 ...	98
<표 5-42> 통행관련 기초자료 분석결과: 서해안	99
<표 5-43> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 서해안 ...	100
<표 5-44> 통행관련 기초자료 분석결과: 영동	101
<표 5-45> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 영동 ·	102
<표 5-46> 통행관련 기초자료 분석결과: 중부	103
<표 5-47> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 중부 ·	104
<표 5-48> 통행관련 기초자료 분석결과: 중부내륙	105
<표 5-49> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 중부내륙 ·	106
<표 5-50> 통행관련 기초자료 분석결과: 호남	107
<표 5-51> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 호남 ·	108
<표 5-52> 통행관련 기초자료 분석결과: 호남	109
<표 5-53> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 대표구간 전체 ·	110
<표 6-1> 통행비용 구분	114
<표 6-2> 통행시간가치(수도권, 2018년)	117
<표 6-3> C.P.I. Index	117
<표 6-4> 유류비용 추정식 파라미터 분석결과	119

<표 6-5> 차량관리비용 추정식 파라미터 분석결과.....	119
<표 6-6> 대기오염비용 추정식 파라미터 추정결과.....	120
<표 6-7> 교통사고비용 추정결과.....	121
<표 6-8> 광역권, 지역간, 수도권에 따른 지속시간 및 집중률	124
<표 6-9> 서울외곽순환 고속도로 첨두-비첨두-심야 평균 V/C	124
<표 6-10> 서울외곽순환 고속도로 시간대별 평균 V/C	125
<표 6-11> 통행비용 산정 결과: 남부구간.....	126
<표 6-12> 통행비용 산정 결과: 북부구간.....	127
<표 6-13> 다차종 반영을 위한 비용변화 검토.....	130
<표 6-14> 구간별 차종비율	130
<표 6-15> 통행비용 산정 결과: 남부구간(다차종).....	131
<표 6-16> 통행비용 산정 결과: 북부구간(다차종).....	132
<표 7-1> 통행시간 신뢰성 모형 계수 최종 분석결과 및 결정계수....	134
<표 7-2> 유료도로 적정 통행료 분석결과.....	135
<표 부록-1> 경부고속도로 기초자료 분석결과.....	146
<표 부록-2> 경인고속도로 기초자료 분석결과	147
<표 부록-3> 서해안고속도로 기초자료 분석결과.....	148
<표 부록-4> 영동고속도로 기초자료 분석결과.....	149
<표 부록-5> 중부고속도로 기초자료 분석결과.....	150
<표 부록-6> 중부내륙고속도로 기초자료 분석결과.....	151
<표 부록-7> 호남고속도로 기초자료 분석결과.....	152
<표 부록-8> 서울외곽순환고속도로 기초자료 분석결과.....	153
<표 부록-9> 단위거리당 통행시간 표준편차 모형 구축결과(2차함수, MD)....	154
<표 부록-10> 단위거리당 통행시간 표준편차 모형 구축결과(과워함수, MD)...	155
<표 부록-11> 단위거리당 통행시간 표준편차 모형 구축결과(로그함수, MD)...	156
<표 부록-12> 단위거리당 통행시간 표준편차 모형 구축결과(2차함수, CI).....	157
<표 부록-13> 단위거리당 통행시간 표준편차 모형 구축결과(과워함수, CI)....	158
<표 부록-14> 단위거리당 통행시간 표준편차 모형 구축결과(로그함수, CI) ...	159

그림 목차

<그림 1-1> 연구수행 체계	3
<그림 2-1> 통행시간 신뢰성 개념	4
<그림 2-2> 도로의 통행시간 신뢰성 지표 산정 개념도	8
<그림 2-3> 도로의 통행시간 신뢰성 지표 중 PT, BT, MT 개념도	18
<그림 4-1> 고속도로 대표구간	33
<그림 4-2> 서울외곽순환 고속도로 중 임의링크 속도별 차량분포(16시) ·	34
<그림 4-3> 전체 자료 중 $\mu \pm X\sigma$ 가 차지하는 비율	36
<그림 5-1> 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 개발 과정	43
<그림 5-2> 통행시간 표준편차(SD)와 MD 산포도	46
<그림 5-3> 통행시간 표준편차(SD)와 링크길이(L) 산포도	46
<그림 5-4> 통행시간 표준편차(SD)와 MD 관계식 검토	48
<그림 5-5> 통행시간 표준편차(SD)와 링크길이 관계식 검토	49
<그림 5-6> 실측값과 모형값 비교: 단거리-1차선형 함수	62
<그림 5-7> 실측값과 모형값 비교: 단거리-2차 함수	63
<그림 5-8> 실측값과 모형값 비교: 단거리-파워 함수	63
<그림 5-9> 실측값과 모형값 비교: 단거리-로그선형 함수	64
<그림 5-10> 실측값과 모형값 비교: 장거리-1차선형 함수	65
<그림 5-11> 실측값과 모형값 비교: 장거리-2차 함수	65
<그림 5-12> 실측값과 모형값 비교: 장거리-파워 함수	66
<그림 5-13> 실측값과 모형값 비교: 장거리-로그선형 함수	66
<그림 5-14> 실측값과 모형값 비교: 장거리-1차선형 함수(재추정)	68
<그림 5-15> 실측값과 모형값 비교: 장거리-2차 함수(재추정)	68
<그림 5-16> 실측값과 모형값 비교: 장거리-파워 함수(재추정)	69
<그림 5-17> 실측값과 모형값 비교: 장거리-로그선형 함수(재추정) ..	69

<그림 5-18> Mean Delay에 따른 통행시간 표준편차 변화: 모형간 비교	70
<그림 5-19> 평균통행시간과 통행시간 표준편차	81
<그림 5-20> 실측값과 모형값 비교: 장거리-영국모형식(재추정)	82
<그림 5-21> 수정표준편차 개념	85
<그림 5-22> 통행시간 표준편차와 통행시간 수정 표준편차의 관계	86
<그림 5-23> 시간대별(0시~24시, 1시간 단위) 평균지체(Mean Delay)	87
<그림 6-1> 서울외곽순환고속도로	122
<그림 6-2> 서울외곽순환고속도로 시간대별 V/C	123
<그림 6-3> 개인평균비용과 사회한계비용의 비용별 구성비율: 남부-침두	128
<그림 6-4> 개인평균비용과 사회한계비용의 비용별 구성비율: 남부-비침두 ..	129
<그림 6-5> 개인평균비용과 사회한계비용의 비용별 구성비율: 북부-침두 ..	129
<그림 6-6> 개인평균비용과 사회한계비용의 비용별 구성비율: 북부-비침두	129

제1장 서론

제1절 연구의 배경 및 목적

통행시간 신뢰성은 계획한 통행시간 대비 실제 통행한 통행시간과의 차이로 설명할 수 있다. 즉, 통행시간 신뢰성은 통행자가 원하는 도착시간에 정확하게 목적지에 도달할 수 있는가를 나타내는 지표로 통행시간 가변성, 변동성, 불확실성 등을 내포하는 개념이다. 통행시간 신뢰성에 대한 연구는 최근에 활발히 진행되고 있으며, 화폐가치화 하여 편익으로 산정해야 한다는 의견이 점차 늘어나고 있다. 과거 Small and Verhoef(2007)의 연구에서 개인의 통행비용에 신뢰성 비용을 추가해야 한다고 제시했지만 개념적으로만 설명했고 실증적인 연구는 진행하지 않았다.

통행시간 신뢰성 비용을 산정하기 위해서는 통행시간 신뢰성 지표와 통행시간 신뢰성 가치가 필요하다. 관련연구들을 살펴보면 통행시간 신뢰성 가치는 설문조사를 통해서 파악하며, 통행시간 신뢰성 지표는 실증자료를 통해 분석하였다. 통행시간 신뢰성 지표를 연구하기 위해서는 개별 통행자들의 통행행태 자료가 필수적이므로, 그 동안 연구가 많지 않았다. 하지만 최근 빅데이터 개념이 등장하면서 분석할 수 있는 다양한 자료들이 제공되고 있다. 통행시간 신뢰성 지표 추정 모형 개발은 과거의 선행연구 결과를 바탕으로 본 연구에서 새로운 모형을 제시할 것이다. 이를 통해서 조금 더 정확한 통행시간 신뢰성 비용을 산정할 수 있

을 것이다.

본 연구는 통행시간 신뢰성 비용산정을 위해서 통행시간 신뢰성 지표 산정모형에 주안점을 두어 분석을 실시하여, 개별통행자들의 통행행태자료를 이용한다. 이를 통하여 통행시간 신뢰성 지표 모형을 제시하고 개인의 통행 비용에 통행시간 신뢰성 비용을 추정할 수 있는 방법 및 추정 결과를 제시한다.

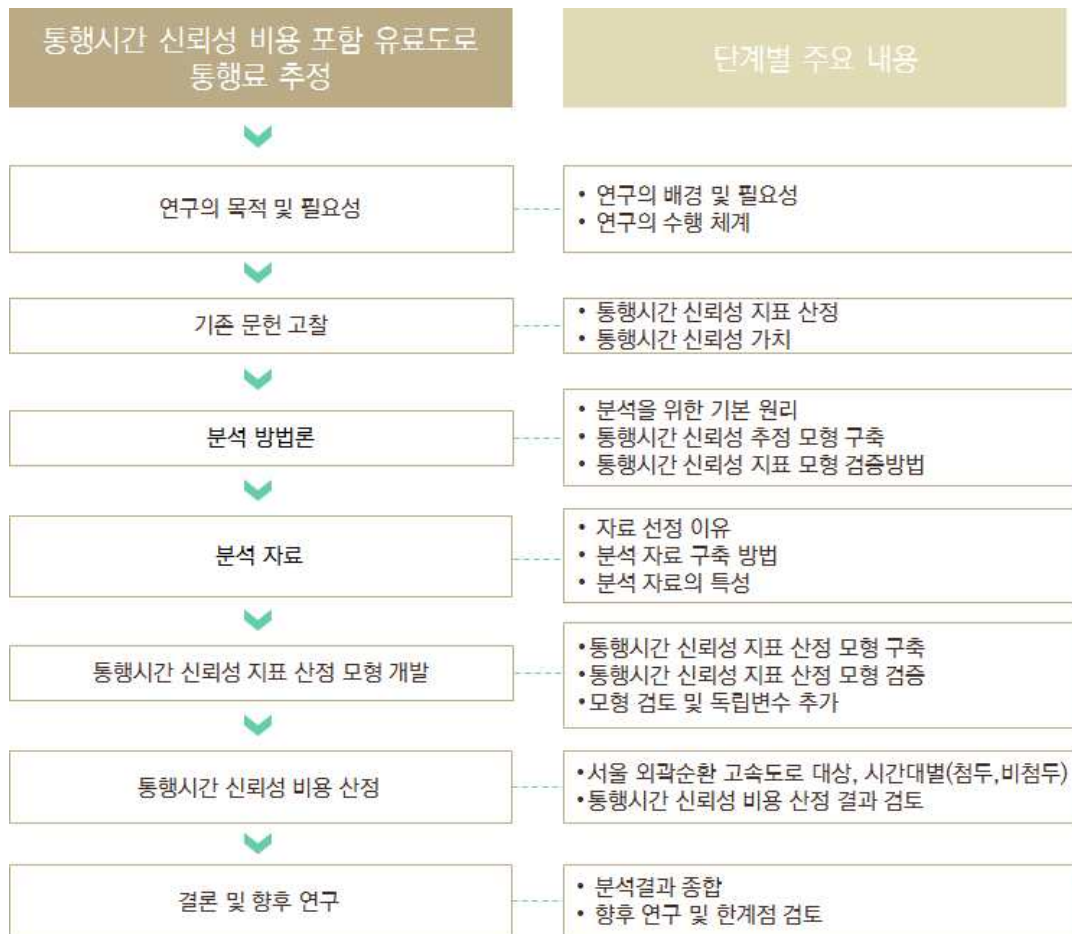
제2절 연구의 내용

본 연구에서는 통행시간 신뢰성 비용을 추정한다. 통행시간 신뢰성 비용을 추정하기 위해서는 통행시간 신뢰성 지표와 통행시간 신뢰성 가치를 산정해야 한다. 통행시간 비용과 비교하여 설명하면 통행시간 신뢰성 지표는 통행시간이 되고 통행시간 신뢰성 가치는 통행시간 가치로 이해하면 될 것이다.

통행시간 신뢰성 지표는 주어진 교통상황 하에서 목적지까지 이동하는데 통행시간의 변동분을 설명하며, 통행시간 신뢰성 가치는 통행시간 변동분이 가지는 가치를 의미한다. 본 연구에서는 통행시간 신뢰성 비용을 산정하기 위해서 통행시간 지표 산정 모형을 추정한다. 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 구축을 위해서 우선 통행시간 신뢰성 지표와 지표를 설명할 수 있는 변수를 살펴본다. 그리고 통행시간 신뢰성 지표와 설명변수의 관계를 살펴보고 유의미한 변수를 파악한다. 통행시간 신뢰성 지표 설명변수와 통행시간 표준편차의 최적 관계식을 파악한 후 통행시간 신뢰성 지표 산정모형을 구축한다. 실증자료를 통해서 통행시간 신뢰성 지표 추정모형간 검증을 통해서 최적 모형을 제시한다. 모형 분석에 이용할 자료는 집계된 자료가 아닌 개별 차량의 속도를 파악할 수 있는 자료이다. 개별 차량 한 대의 통행속도를 이용하여 링크의 평균통행시간, 통행시간 표준편차 등을 산정하고 이를 바탕으로 통행시간 신뢰성 지표 산정모형을 구축한다. 그리고 추가적인 독립변수 검토를 통해서 과거의 연구에서는 반영하지 못했던 변수를 파악하게 된다. 그리고 최종적으로 본 연구에서 제안하는 통행시간 신뢰성 추정모형을 제시할 것이다.

제3절 연구의 수행체계

도로 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 개발을 위해서 우선 연구의 배경 및 필요성을 살펴보고 기존문헌을 검토한다. 그리고 통행시간 신뢰성 추정 모형과 모형 검증 방법을 제시한다. 그리고 분석을 위한 자료를 설명하고 자료 구축과정을 제시한다. 그리고 분석방법과 분석자료를 이용하여 도출된 결과를 제시한다. 분석결과는 고속도로 대표구간을 대상으로 구축한 고속도로의 통행시간 신뢰성 추정 모형과 신뢰성 비용 산정이다. 분석결과에 대한 추가적인 고찰 이후 결론과 향후 연구를 제시한다. 연구의 수행 과정은 그림 <1-1>과 같다.



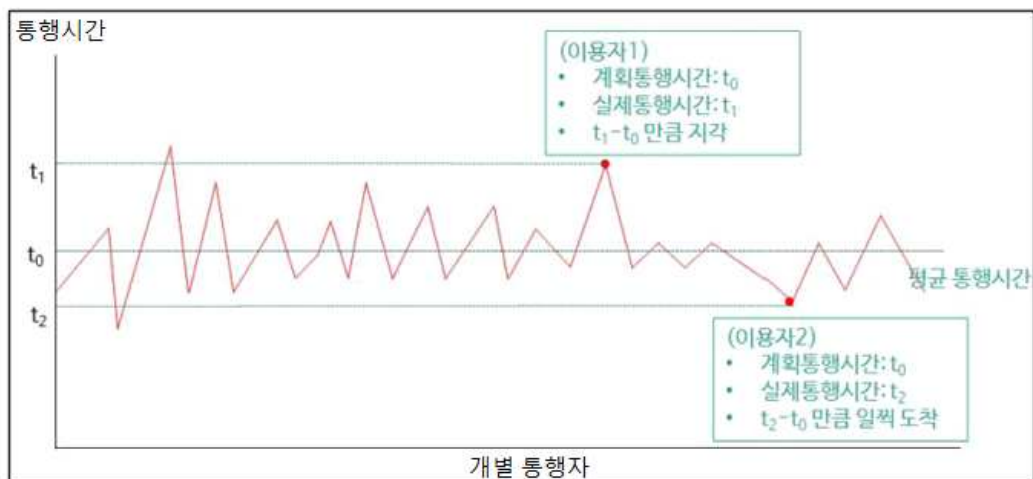
<그림 1-1> 연구수행 체계

제2장 이론 및 선행연구 고찰

제1절 이론적 배경

1. 통행시간 신뢰성의 개념

통행시간 신뢰성은 통행자가 원하는 도착시간에 정확하게 목적지에 도달할 수 있는가를 나타내는 지표로 통행시간 가변성, 변동성, 불확실성 등을 내포하고 있다. 통행시간 신뢰성은 계획한 통행시간 대비 실제 통행한 통행시간과의 차이로 측정한다. <그림 2-1>에서 이용자 1은 계획 통행시간인 t_0 를 예상하고 출발하였지만 여러 변수들에 의하여 통행시간은 길어졌고 실제통행시간인 t_1 만에 목적지를 도착하였다. 반면에 이용자 2는 계획통행시간인 t_0 을 예상하고 출발하였지만 실제통행시간 t_2 만에 도착하여 목적지에서 $t_2 - t_0$ 시간만큼 대기시간이 발생하였다.



<그림 2-1> 통행시간 신뢰성 개념

이용자 1, 2 모두 계획통행시간 t_0 에 도착하지 못하여 비효용이 발생하였다. 만약 통행시간 신뢰성이 높은 수단 또는 경로를 이용하였다면 이러한 비효용은 감소하였을 것이다. 이렇게 계획통행시간과 실제통행시간의 차이만큼 시간 손실이 발생한다. 그러나 통행시간 신뢰성이 개선될 경우 이러한 시간손실이 줄어들고 통행자의 효용은 개선될 것이다. 반면 통행시간 신뢰성이 낮다면 목적지까지 통행시간을 정확히 파악하기 힘들기 때문에 긴 여유시간을 두고 출발을 하게 되며 이는 개별 통행자가 다른일에 집중할 시간이 부족하고 이로써 비효용이 발생한다. 이처럼 우리는 실제 통행을 하면서 계획했던 시간보다 일찍 혹은 늦게 가면서 통행시간 신뢰성이라는 항목을 비용으로 체감하고 있다.

Small and Verhoef의 저서 The Economics of Urban Transportation¹⁾에서도 일반적인 정태적 모형에서는 통행자의 통행비용은 시간비용과 혼잡으로 발생하는 추가비용만을 고려한다. 하지만 혼잡이 시간대별로 변동이 심한 동태적 모형에서는 통행자의 통행비용에 시간비용과 혼잡비용 외에 Schedule-Delay Cost를 반영해야 한다고 한다. 이는 통행시간의 불확실성을 개인의 비용으로 고려해야하기 때문이다. 하지만 추가로 Schedule-Delay Cost를 반영할만한 적절한 모형이 부족하다고 언급하였다. 국내에서도 교통시설 투자평가지침 또는 도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침에서도 통행자의 직접편익으로 통행시간 신뢰성을 언급하고 있지만 일반적인 분석방법론이 없다는 이유로 반영하지 않고 있다. 최영은(2017) 연구에서 통행시간 신뢰성은 운전자 특성, 차량 간의 상호작용, 교통통제, 사고, 날씨 등의 영향으로 동일한 기종점간의 통행시간 변동으로 정의하였다. 한국교통연구원(2016) 연구에서 통행시간 신뢰성은 이용자가 계획하는 통행시간이 실제 경험하는 통행시간과 얼마나 차이가 있는지를 나타내는 지표로, 통행시간 변동이 작을수록 신뢰성은 높아지고 이용자 효용이 증가한다고 제시하였다.

1) K.A. Small, E.T. Verhoef, The Economics of Urban Transportation, Routledge, pp. 88-93.

2. 통행시간 신뢰성의 비용

개인이 목적지까지 도달하는데 소요되는 통행시간과 통행비용(차량 운행비용 등)을 포함한 비용을 총 통행비용이라 가정한다. 총 통행비용 항목은 개인의 통행비용과 사회적 통행비용, 통행시간 신뢰성 비용으로 구성된다고 하면 다음의 식을 도출할 수 있다.

$$tc^{t,l}(q_o) = c_p^{t,l}(q_o) + c_s^{t,l}(q_o) + c_r^{t,l}(q_o) \quad (2-1)$$

여기서,

- tc : 총 통행비용
- c_p : 개인의 사적 통행비용
- c_s : 사회적 통행비용
- c_r : 통행시간 신뢰성 비용
- t, l : 시간대, 링크

개인의 사적 통행비용은 BPR 함수를 통해 도출된 통행시간에 통행시간 가치를 이용하여 도출되며, 차량운행비용은 국토교통부(2017)의 지침을 활용하여 산정한다.

사회적 통행비용에 포함되는 혼잡비용은 6장에서 기술되는 내용을 활용하여 산정하며, 환경비용 중 대기오염 비용은 국토교통부(2017)의 지침을 활용한다.

그리고 통행시간 신뢰성 비용을 산정하기 위해서는 통행시간 신뢰성을 어떠한 모형으로 가정 분석할지 결정해야 한다. Small and Verhoef의 저서 The Economics of Urban Transportation에서는 schedule-delay 모형을 가정하여 분석하였다.

Schedule-Delay 모형은 일정 모형이라고 하며 개별 통행자의 선호 도착 시간을 고려하여 선호 도착시간보다 늦으면 혹은 일찍 도착할 경우 비용이 발생한다는 개념이다. Schedule-Delay 모형을 가정하면 신뢰성

비용은 다음과 같이 계산된다.

$$c_r = \frac{\delta t}{2} \left(\frac{V_d}{V_c} - 1 \right) \quad (2-2)$$

$$\delta = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \quad (2-3)$$

$$C(T_r) = \alpha \cdot T + \beta \cdot SDE + \gamma \cdot SDL + \theta \cdot DL \quad (2-4)$$

여기서,

t : 분석 시간대

V_d, V_c : 교통량, 용량

$\alpha, \beta, \gamma, \theta$: 파라미터

SDE : 조기 지체

SDL : 지연 지체

DL : 지연 지체 추가 비용(SDL 이 1보다 클 경우 1, 아니면 0)

통행시간 신뢰성 지표를 표준편차 모형으로 가정하면, 표준편차를 설명하는 독립 변수에 따라 다음의 식을 이용할 수 있다.

$$\sigma = f(CI \text{ or } V/C \text{ or } MD) \quad (2-5)$$

여기서,

CI : 평균속도 통행시간/기준속도 통행시간

V/C : 교통량-용량 비율

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

σ : 링크 통행시간 표준편차

기존 연구에서는 일정 모형을 이용하였지만, 개념적인 설명에 그쳤으며, 일정 모형을 개인의 비용으로 분석하기 위해서는 모든 개별 통행자의 선호 도착시간을 알아야 하는 단점이 있다. 그리고 시간표가 없는 승용차 통행에 있어서 일정 모형은 표준편차 모형과 형식적 일치성이 확인된바가 있다고 한다(최영은, 2017). 따라서 본 연구에서는 표준편차 모형을 이용하여 통행시간 신뢰성 비용을 산정한다.

제2절 선행연구 고찰

1. 통행시간 신뢰성 지표

장수은, 강지혜, 이승준(2008)의 연구는 국내 도로 및 철도 이용실적 자료를 바탕으로 통행시간 신뢰성 지표 원단위를 산정하였다. 통행시간 신뢰성을 측정하는 지표로는 계획 통행시간과 실제통행시간의 차이인 지연시간으로 하였으며 개념은 다음과 같다.

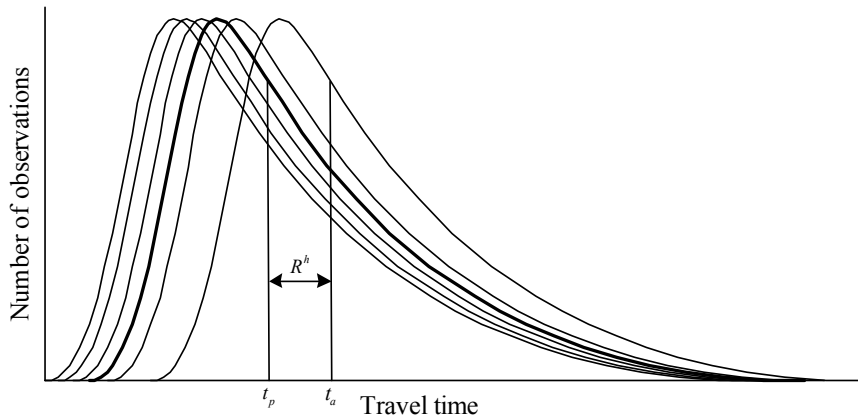
$$R^h = t_a - t_p = t_a - \frac{\sum_{a=1}^N t_a}{N} \quad s.t. \ t_a \geq t_p \quad (2-6)$$

여기서,

$$t_p = \frac{\sum_{a=1}^N t_a}{N} \quad : \quad \text{평균 통행시간(계획 통행시간)}$$

R^h : 지연시간

t_a : 실제통행시간



<그림 2-2> 도로의 통행시간 신뢰성 지표 산정 개념도

자료: 장수은, 강지혜, 이승준(2008)

분석을 위해서 이용한 자료는 지역간도로의 데이터는 2008년 한국도로공사, 도시부도로는 서울시 도로교통 데이터이다. 도로 통행시간 신뢰성

추정 모형 구축은 지연시간을 종속변수, 교통량을 독립변수로 하여 2차 포물선 형태의 함수식으로 하였다. 모형식의 형태는 교통혼잡수준이 매우 낮을 때에는 도로 통행시간 신뢰성이 높으며, 점차 혼잡이 심화(교통량이 증가)할수록 통행시간 신뢰성은 낮아지고(지연시간은 커짐), 혼잡이 극심해지면 통행시간 신뢰성은 다시 높아지는 것으로 구축되었다.

<표 2-1> 도로유형별 지표추정 결과

(R =초/km, Q =대/시·차로)

구분	연속류	단속류
지역 간 통행	$R = -0.000003Q^2 + 0.008Q + 1.2392$	-
도시부 통행	$R = -0.000009Q^2 + 0.0241Q + 0.0095$	$R = -0.00006Q^2 + 0.08Q + 8.8117$

자료: 장수은, 강지혜, 김승준(2008)

한국도로공사(2013)의 연구에서는 도로 통행시간 신뢰성 지표를 신뢰성 지표로 Buffer Time을 이용하였으며, 도로등급별로 구분하여 제시하였다. Buffer Time은 평균통행시간과 상위 95% 통행시간의 차이로 하였다.

$$BT = U_{95} - AT \quad (2-7)$$

여기서,

BT : 완충시간(Buffer Time)

U_{95} : 통행시간 분포 상위 95%의 통행시간

AT : 평균통행시간

분석을 위한 자료로는 2012년의 고속도로 및 국도 VDS의 15분 단위 자료이며, 연구대상 도로는 경부고속도로, 서해안고속도로, 영동고속도로 3개축이고, 일반국도 1호선, 36호선, 38호선, 39호선, 3호선, 42호선의 6개 노선을 대상으로 하였다.

도로 통행시간 신뢰성을 나타내는 지표는 Buffer Time으로 하였고, Buffer Time을 결정하는 변수로는 교통량-용량비(V/C)를 이용하였다.

최초에는 V/C에 따른 Buffer Time 관계식을 도출하려 했으나 도출과정에서 문제가 발생하여 V/C에 따른 Buffer Time 원단위로만 제시하였다. 도로등급별·서비스수준별 신뢰도 지표를 제시하였으며, 전반적으로 고속도로가 일반도로보다 통행시간 신뢰성이 우수한 것으로 나타났다.

<표 2-2> 도로위계-LOS에 따른 Buffer Time 산정 결과

LOS	고속도로		일반도로	
	v/c	Buffer Time(초/km)	v/c	Buffer Time(초/km)
A	≤ 0.27	4.04	≤ 0.20	8.04
B	≤ 0.45	4.84	≤ 0.45	9.14
C	≤ 0.61	6.86	≤ 0.70	12.84
D	≤ 0.80	9.01	≤ 0.85	15.52
E	≤ 1.00	17.33	≤ 1.00	24.59
F	>1.00	17.33	>1.00	24.59

자료: 한국도로공사, 2013

한국교통연구원(2016)의 연구에서는 교통관련사업 신규편익 발굴의 일환으로 통행시간 신뢰성 향상편익 산정방법을 제시하였다. 도로 통행시간 신뢰성 지표로는 표준편차를 사용하였으며, 그 이유는 변동성을 나타내는 통계적 범위로 가장 대표적인 지표이며, 이용자가 목표하는 도착예상시간보다 빠르거나 늦지 않도록 설정하는 버퍼타임의 평균 개념이기 때문이다. 그리고 통행시간 신뢰성 향상 효과를 교통사업의 편익으로 반영하고 있는 독일, 네덜란드, 호주 등 해외 주요 국가들은 대부분 표준편차를 신뢰성지표로 반영하고 있다.

한국교통연구원(2016)의 연구를 위한 기초자료는 TCS자료로 2014년 1년간의 1시간 단위의 평균 속도와 교통량 자료를 사용하였으며 공간적 범위는 7개 고속도로 노선(경부, 남해, 서해안, 호남, 중부, 중부내륙, 영동)이었다.

통행시간 신뢰성 지표 분석결과는 교통량-용량비(V/C)에 따른 통행시간 표준편차를 예측하고 원단위를 1차적으로 제시하였다.

<표 2-3> V/C에 따른 통행시간 표준편차

V/C	통행시간 표준편차(초)
0 - 0.1	5.06
0.1 - 0.2	4.29
0.2 - 0.3	5.76
0.3 - 0.4	8.03
0.4 - 0.5	10.27
0.5 - 0.6	13.62
0.6 - 0.7	14.05
0.7 - 0.8	17.46
0.8 - 0.9	17.90
0.9 -	18.78

자료: 한국교통연구원, 2016

그리고 교통량-용량비(V/C)에 따른 통행시간 표준편차 산정식을 2차적으로 제시하였다. 이때 통행시간 표준편차 산정식은 독일의 “Methodology Manual for the Federal Transport Infrastructure Plan 2030”에 제시되어 있는 산정식을 참고로 하였다.

<표 2-4> V/C에 따른 표준편차 추정식

구분	모형식
본 연구	$\sigma_k = 0.003 \cdot (v/c - 0.65)^{0.491}$
독일 지침	$\sigma_k = 1.54 \cdot (v/c - 0.75)^{2.99}$

자료: 한국교통연구원, 2016

독일의 “Methodology Manual for the Federal Transport Infrastructure Plan 2030”에 제시되어 있는 방법은 V/C를 이용하여 통행시간 표준편차를 산정하며, 일정 V/C이하에서는 표준편차가 0이 되도록 하여 비 혼잡 구간에서는 도로 통행시간 신뢰성 편익이 산정되지 않도록 하였다.

최영은(2017)의 연구에서는 통행시간 신뢰성 가치 산정을 위해서 일부 도로에 대한 통행시간 신뢰성을 추정하였으며 유료도로, 무료도로로 구

분하여 통행시간 표준편차를 추정하였다. 유료도로의 통행시간 표준편차는 직접 계산하였으며, 무료도로에 대한 통행시간 표준편차는 2014년 영국의 TAG(Transport Analysis Guidance) 지침을 활용하였다.

최영은(2017)의 연구에서 통행시간 신뢰성 지표산정을 위해서 이용한 자료는 2015년 서울도심부 속도자료를 이용하였으며, 분석대상구간은 분당수서 고속화도로와 테헤란로였다. 통행시간 표준편차 추정식 결과는 다음과 같다.

$$CV = 0.2 CI^{0.37} d^{-0.27} \quad (2-8)$$

여기서,

CV : 통행시간 표준편차/평균통행시간

CI : 평균속도 통행시간/기준속도 통행시간

d : 통행거리

모형식을 이용하여 통행시간 표준편차를 산정한 결과 통행시간은 유료도로가 무료도로보다 낮은 것으로 나타났고, 통행시간 신뢰성 또한 유료도로가 무료도로보다 우월한 것으로 나타났다.

<표 2-5> 유료도로/무료도로 표준편차 추정 결과

구분	유료도로를 선택한 통행		무료도로를 선택한 통행	
	유료도로 대안 (선택 대안)	무료도로 대안 (미선택 대안)	유료도로 대안 (미선택 대안)	무료도로 대안 (선택 대안)
최솟값	1.83	1.56	1.44	1.55
평균값	4.75	5.05	3.74	5.39
최댓값	10.02	12.02	6.82	12.84

자료: 최영은, 2017

Lint, Zuylen, Tu(2008)은 도로 통행시간 신뢰성 지표에 대하여 연구를 하였으며, 통행시간 신뢰성 지표는 특정시간대(첨두)에 집중되는 통행량으로 인한 통행시간 변동성을 잘 반영해야 한다고 하였다. 현재 통행시간 신뢰성을 측정하기 위한 지표로는 ①통계적 지표, ②Buffer Time, ③Tardy trip, ④확률적 지표가 있다고 하며, 새로운 지표인 λ^{var} , λ^{skew} 를 제시하였다.

<표 2-6> 도로 통행시간 신뢰성 지표

지표	수식	개요
통행시간 표준편차	$\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum (TT_i - M)^2}$	일반적인 통행시간의 표준편차
변동 계수	$\frac{STD}{M}$	통행시간 표준편차와 평균통행시간의 비율
Buffer time	$\frac{TT_{90} - M}{M}$	정시도착을 위한 여분의 통행시간 비율
Tardy Trip	$\frac{M _{TT_i > TT_{80}} - M}{M}$	하위 20% 통행시간과 평균 통행시간의 차이
Probabilistic	$P(TT_i \geq 1.2 \times TT_{50})$	중위 통행시간보다 20%이상 더 소요될 확률
λ^{var}	$\frac{T_{90} - T_{10}}{T_{50}}$	통행시간 분포의 너비를 반영
λ^{skew}	$\frac{T_{90} - T_{50}}{T_{50} - T_{10}}$	통행시간 분포의 첨도를 반영

TT_i : 개별차량 통행시간

M : 평균통행시간

STD : 통행시간 표준편차

TT_{α} : 하위 $\alpha\%$ 일때의 통행시간

자료: J.W.C. van Lint, Henk J. van Zuylen, H. Tu(2008)

de Jong, Bliemer(2015)의 연구에서는 통행시간 신뢰성 편익 산정방법에 대하여 기존의 연구, 각 국가별 편익 산정 지침을 검토하였다. 통행시간 신뢰성 편익을 비용편익에 포함하기 위해서는 통행시간 신뢰성 가치와 신뢰성 추정 모형 모두 중요함을 언급하였다. 통행시간 신뢰성 추정 모형에 대해서 전문가 패널 분석을 통하여 최적의 방법이 무엇인가 대해서 심층적인 연구를 실시하였다.

<표 2-7> 각 국가의 통행시간 신뢰성 지표 산정 모형

국가	참고문헌	통행시간 신뢰성 지표 산정 모형
영국	Arup(2004)	$CV = 0.148 CT^{0.781} D^{-0.285}$ <p>여기서, CV: 통행시간 표준편차/ 평균통행시간 CT: 평균속도 통행시간/ 기준속도 통행시간 D: 도로연장</p>
호주 · 뉴질랜드	Australian Transort Council(2006) 등	$\sigma = s_0 + \frac{s - s_0}{1 + \exp[b(v/c - 1)]}$ <p>여기서, S_0: 표준편차 최솟값 S: 표준편차 최댓값 b: 계수</p>
네덜란드	Hellinga(2011)	$\sigma = -11.091 + 0.9589 TT$ <p>여기서, TT: 통행시간</p>
	Kouwenhoven(2014)	$\sigma = a + b \cdot MD + c \cdot \ln(MD + 1) + d \cdot D$ <p>여기서, MD: 평균 지체 D: 통행 길이 a, b, c, d: 계수</p>
미국	Mahmassani(2011)	$\sigma = a + b(T/D)$ <p>여기서, T: 통행 시간 D: 통행 길이 a, b: 계수</p>
독일	Geistefeldt et al.(2014)	$\sigma = a(MD)^b$ <p>여기서, MD: 평균 지체 a, d: 계수</p>

자료: G. C. de Jong, M. C. J Bliemer(2015)

대부분의 국가들은 통행시간 신뢰성 지표를 나타내는 종속변수로 통행시간 표준편차를 이용하고, 도로의 통행상태 등을 독립변수로 하여 통행시간 신뢰성 추정 모형을 구축하였다. 도로 통행상태를 나타내는 변수는 용량에 대한 교통량 비(V/C), 실제통행시간과 기준속도 통행시간의 차이(MD), 실제통행시간에 대한 기준속도 통행시간의 비율(CI) 등을 사용한다.

많은 연구에서는 도로의 통행상태(혼잡)를 통행시간 신뢰성에 영향을 주는 주요 변수라고 가정하고 통행시간 신뢰성 추정 모형을 개발하였다. 도로의 통행상태(혼잡)외에 다른 변수를 추가하여 분석한 연구도 있으며, Arup(2004), Mahmassani(2011), Kouwenhoven(2014)의 연구에서는 경로 또는 링크의 길이(D)를 통행시간 신뢰성에 영향을 주는 요인으로 통행시간 신뢰성 추정모형을 구축하였다.

그리고 신뢰성 지표에는 통행시간 표준편차, Buffer Time, 통행시간 분산, 정시성, 지연시간 등이 있으나 통행시간 신뢰성을 설명하는 변수로 가장 적절한 지표가 무엇인지 전문가 설문을 실시하였다. 전문가 인터뷰 결과, 비용편익분석에 사용하는 통행시간 신뢰성의 지표로 통행시간표준편차가 가장 적절하다고 응답하였다(43%). 실질적으로 활용할 수 있는 통행시간 신뢰성 지표는 통행시간 표준편차와 Buffer Time이 있으나, Buffer Time은 통행시간 분포가 좌우 대칭(Symmetry)이면 표준편차와 동일한 결과 값을 보인다고 제시하였다.

Kouwenhoven, Warffemius(2016)는 네덜란드 고속도로 250개 경로의 자료를 수집하여 통행시간 신뢰성 추정식을 개발하였다. 통행시간 신뢰성 측정 지표로 표준편차를 선정하고, 표준편차 산정을 위한 독립변수로 통행시간(Travel Time:TT), 평균지체(Mean Delay), 링크길이(L), 혼잡지표(Congestion Index)를 이용하였다. 통행시간 신뢰성 추정식 개발에 앞서 표준편차를 통행시간 신뢰성 측정지표로 활용한 기존의 추정식을 제시하였다.

<표 2-8> 표준편차를 이용한 신뢰성 추정 모형

모형	연구모형(표준편차/분)	연구 출처
Linear Model	$\sigma = 0.71 + 0.17 TT$	Hellinga (2011)
Length-standardized Linear Model	$\sigma = -0.41 + 0.78 TT/L$	SHRP2 (2014)
Length-standardized cubic Model	$\sigma = -0.09 - 0.38(TT/L) + 1.37(TT/L)^2 - 0.50(TT/L)^3$	Mott MacDonald (2009)
Relation Between Coefficient of variation and Congestion Index	$CV = -0.050 CI^{3.344} L^{0.081}$	Eliasson (2006)
	$CV = \exp(-2.79 + 3.21(CI - 1) - 0.65(CI - 1)^3)$	Geistefeldt et al. (2014)
	$\sigma = -0.04 + 1.18MD - 0.03MD^2 + 0.005MD^3 - 0.003L - 0.00003L^2$	Peer et al. (2012)

자료: Kouwenhoven, Warffemius(2016)

Mean Delay는 차량 혼잡 등의 영향으로 인한 통행시간 변동을 고려해 주는 변수이며 해당연구에서는 평균통행시간과 기준통행시간의 차이로 가정하였다. Kouwenhoven, Warffemius(2016)는 기존의 추정식과 새롭게 개발한 추정식을 비교하며, 최적 모형식을 제시하였는데, 그 형태는 다음과 같다.

$$Y = -0.54 + 0.48 \times MD + 4.54^{0.10} \log(MD + 1) - 0.009 \times L \quad (2-9)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

Y : 링크 통행시간 표준편차(σ)

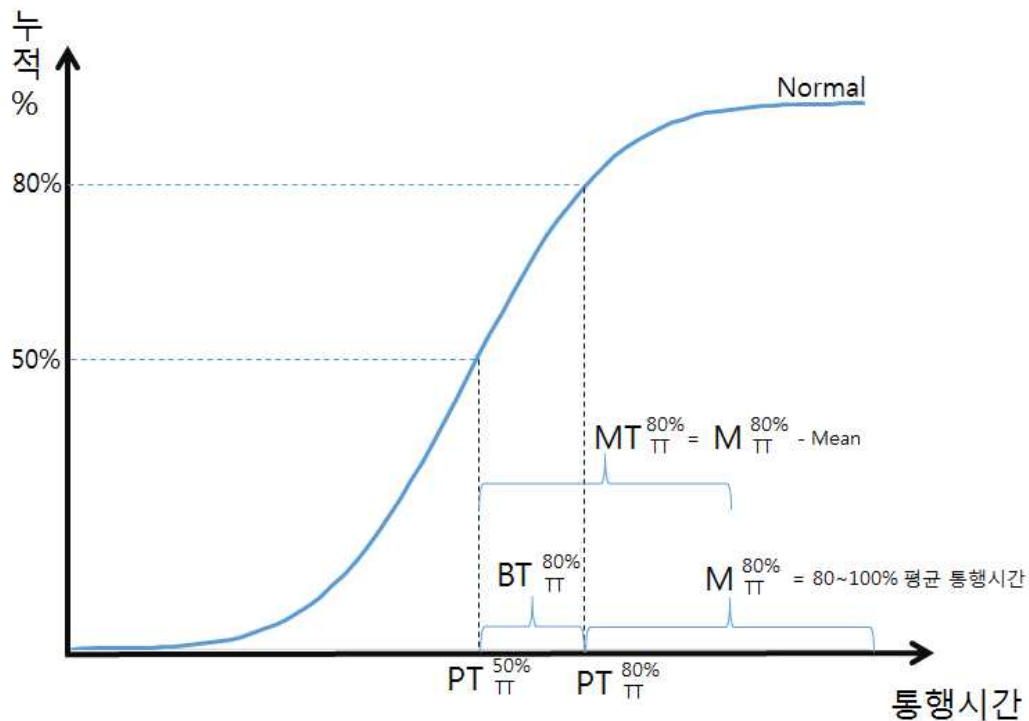
Bhouri, Aron, Lebacque, Haj-Salem(2017)의 연구에서는 가변차로제도 (Hard Shoulder Running)의 효과를 통행시간 신뢰성 개선으로 살펴보았다. 신뢰성 개선 정도에 대해서는 다양한 통행시간 신뢰성 지표로 제시하였으며, 통행시간 신뢰성 지표에 대한 계산방법, 참고사항 등을 언급하였다. Bhouri, Aron, Lebacque, Haj-Salem(2017)에서 제시하는 통행시간 신뢰성 지표들은 다음과 같다.

<표 2-9> 통행시간 신뢰성 지표

지표	계산 방법
Average	$M_{TT} = \sum_1^n \frac{TT_i}{N}$
Standard Deviation	$STD_{TT} = \sqrt{\sum_1^n \frac{(TT_i - M_{TT})^2}{N-1}}$
Coefficient of Variation	$COV_{TT} = \frac{STD_{TT}}{M_{TT}}$
Buffer Time	$BT_{TT} = P_{TT}^{95\%} - M_{TT}$
Planning Time	$PT_{TT} = P_{TT}^{95\%}$
Misery Time	$MT_{TT} = M_{TT}^{80\%} - M_{TT}$
Buffer Index	$BI_{TT} = \frac{BT_{TT}}{M_{TT}}$
Planning Time Index	$PI_{TT} = \frac{PT}{TT_{free\ flow}}$
Misery Index(Tardy trip)	$MI_{TT} = \frac{MT_{TT}}{M_{TT}}$
Probabilistic Indicator	$Pr(TT_i \geq (1 + \beta) \cdot P_{TT}^{50\%})$
Skewness	$\frac{P_{TT}^{90\%} - P_{TT}^{50\%}}{P_{TT}^{50\%} - P_{TT}^{10\%}}$
Width	$\frac{P_{TT}^{90\%} - P_{TT}^{10\%}}{P_{TT}^{50\%}}$

자료: Bhouri, Aron, Lebacque, Haj-Salem(2017)

<표 2-12>에서 제시하는 통행시간 신뢰성 지표들을 간략히 그림으로 살펴보면 아래 <그림 2-4>와 같다. PT_{TT}^x 는 전체 통행시간 중에서 x%에 해당하는 통행시간을 의미한다. BT_{TT}^x 는 PT_{TT}^x 통행시간과 평균통행시간의 차이를 의미한다. MT_{TT}^x 는 통행시간 중 상위 x%의 평균통행시간과 전체 평균 통행시간의 차이를 의미한다.



<그림 2-3> 도로의 통행시간 신뢰성 지표 중 PT, BT, MT 개념도

Bhourri, Aron, Lebacque, Haj-Salem(2017)에서는 가변차로제도(Hard Shoulder Running) 시행으로 대부분의 통행시간 신뢰성 지표가 개선되는 것으로 나타났다. 하지만 상대적 지표인 BI(Buffer Index), MI(Misery Index)는 신뢰성 개선을 제대로 표현하지 못하는 것으로 나타났기 때문에 BI, MI 지표에 대한 추정치는 주의깊게 분석해야 한다고 언급하였다.

통행시간 신뢰성 지표에 대한 국내외 선행연구들을 살펴보았으며, 각 선행연구들 중에서 통행시간 신뢰성 지표 산정식을 종합하면 다음과 같다.

<표 2-10> 통행시간 신뢰성 지표 관련 선행연구 종합

연구	통행시간 신뢰성 지표	지표 형태
한국도로공사(2013)	Buffer Time	·V/C별 지표 원단위 제시
한국교통연구원(2016)	통행시간 표준편차	·V/C별 표준편차 원단위 제시 $\sigma_k = 0.003 \cdot (v/c - 0.75)^{0.491}$
최영은(2017)	통행시간 표준편차	$CV = 0.2 CT^{0.37} d^{-0.27}$ 여기서, CV : 통행시간표준편차/평균통행시간 CT : 평균속도통행시간/기준속도통행시간 d : 통행거리
장수은, 강지혜, 이승준 (2008)	통행시간과 계획된 통행시간 차이	$R = -0.000003Q^2 + 0.008Q + 1.2392$ (지역간 연속류) $R = -0.000009Q^2 + 0.0241Q + 0.0095$ (도시부 단속류) $R = -0.00006Q^2 + 0.08Q + 8.8117$ (도시부 연속류) 여기서, Q : 교통량(대차·차로)
Lint, Zuylen, Tu(2008)	통행시간 차이의 비율	$\lambda^{var} = \frac{T_{90} - T_{10}}{T_{50}}$ $\lambda^{skew} = \frac{T_{90} - T_{50}}{T_{50} - T_{10}}$ 여기서, T_a : 상위 a%의 통행시간
DfT(2014) ²⁾	통행시간 표준편차	$CV = 0.16 CT^{1.02} d^{-0.39}$
FMTDI(2015) ³⁾	통행시간 표준편차	$SD(x) = 0.2 \times (V/C - 0.75)^{1.7} \times \sqrt{\frac{L}{L_{Bezug}}}$
Kouwenhoven(2016)	통행시간 표준편차	$\sigma = -0.54 + 0.48 \times MD$ $+ 4.54^{0.10} \log(MD + 1) - 0.009 \times L$ 여기서, MD : 평균지체

2) DfT(2014)는 영국 교통국의 TAG 지침 참고

3) FMTDI(2015)는 독일 교통국(Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure)의 Manual for the Federal Transport Infrastructure 지침 참고

2. 통행시간 신뢰성 가치

장수은, 강지혜(2008)의 연구에서는 통행시간 신뢰성 가치를 추정하였으며, 선택실험법(CE, Choice Experiment)을 이용하여 설문조사를 실시한 후 수단선택 모형을 구축하였다.

설문조사는 통행비용, 통행시간, 예상치 못한 추가지체(신뢰성)을 각 수단(승용차, 택시, 버스, 전철)별로 다르게 하여 응답자가 자신의 선호를 표현하도록 하였다. 설문조사는 지역간과 도시부로 구분하여 실시하였다.

통행시간 신뢰성 추정결과 지역간 통행은 업무통행의 RR비율은 0.77, 비업무 통행은 0.82, 도시부 통행의 RR비율은 0.94로 추정되었다. 지역간 통행보다는 도시부 통행이 더 높은 신뢰성 가치를 보여주었다.

<표 2-11> 통행시간 신뢰성 추정결과(장수은, 강지혜, 2008)

항목	지역 간		도시부 통행
	업무	비업무	
통행시간가치(원/인·시)	10,435	3,320	8,878
신뢰도가치(원/인·시)	8,087	2,714	8,328
R/R	0.77	0.82	0.94

자료: 장수은, 강지혜(2008)

한국도로공사(2013)의 연구에서는 통행시간가치 및 통행시간 신뢰성 가치를 산출하였으며, 통행목적에 따라 통행시간가치 및 통행시간 신뢰성 가치를 따로 추정하였다. 통행시간 신뢰성 가치 추정은 선택 실험법(CE, Choice Experiment)사용하여 설문조사를 실시한 후 응답 결과를 통하여 경로선택 모형을 구축하였다.

설문조사는 고속도로와 일반도로에 대한 경로선택상황을 제시하고 이때 응답자는 통행시간, 통행비용, 통행시간 신뢰성에 있어 차이가 나는 2개의 경로중 하나의 경로를 선택하게 하였다. 조사대상구간은 경부고속도로, 서해안고속도로, 영동고속도로 이용자들을 대상으로 SP조사를 실시하였으며, 각 도로의 대안경로로 무료도로(국도)를 제시하였다.

경로선택 모형을 구축하여 신뢰성 가치를 산정한 결과 신뢰성가치는 비업무통행보다 업무통행에서 높게 나타났으며 RR은 0.57~0.52로 산정되었다.

<표 2-12> RR 및 통행시간 신뢰성 추정 결과(한국도로공사, 2013)

항목	업무	비업무	전체
통행시간가치(원/인·시)	9,531	7,688	8,495
신뢰도가치(원/인·시)	5,409	4,108	4,560
R/R	0.57	0.52	0.54

자료: 한국도로공사, 2013

한국교통연구원(2016)의 연구에서는 통행시간 신뢰성 가치를 추정하였으며, 장수은, 강지혜(2008)연구를 참고하여 분석방법론을 설정하였다. 기본적으로 분석방법론 및 설문조사 설계는 장수은, 강지혜(2008)연구와 많이 동일하다. 다만 선택 실험법 이외에 조건부 가치측정법으로 통행시간 신뢰성 가치를 추정하였으며 조건부 가치측정법으로 산정된 결과는 선택 실험법 결과의 검증에 활용하였다. 설문조사는 지역간 통행/도시부 통행, 업무/비업무로 구분하여 실시하였으며, 도시부 통행 총 341명 대상, 지역간 통행 총 724명 대상으로 하였다.

분석결과 도시부 업무통행 목적의 RR은 0.95, 비업무 목적은 0.88로 추정되었으며, 지역간 업무통행 목적의 RR은 0.91, 비업무 목적은 0.87로 추정되었다. 지역간 보다는 도시부 통행이, 비업무 보다는 업무 통행이 더 높은 RR값을 나타내는 경향을 보여주었다.

<표 2-13> 선택실험법을 통한 RR 분석 결과 (한국교통연구원, 2016)

항목	도시부 통행		지역간 통행	
	업무	비업무	업무	비업무
통행시간가치(원/인·시)	12,437	3,410	9,750	2,623
신뢰도가치(원/인·시)	11,826	3,002	8,835	2,283
R/R	0.95	0.88	0.91	0.87

자료: 한국교통연구원, 2016

최영은(2017)연구에서는 유료도로 선택행태를 바탕으로 통행시간 신뢰성 가치를 추정하였다. 분석을 위한 자료는 수도권 가구통행실태조사 자료(2010)를 이용하였다. 연구대상 구간은 경부고속도로 수원IC~한남IC이며, 해당 구간을 지나가는 통행만을 대상으로 경로선택 모형 추정을 위한 기본자료를 구축하였다. 경로선택 모형은 혼합로짓모형을 이용하였으며 전체 샘플수는 353통행이었다.

혼합로짓모형의 모집단 계수를 통하여 제시된 분석결과는 전체 통행자의 RR비율은 1.31로 나타났으며, 통근통행은 1.38로 나타났다. 그리고 개별계수를 통하여 제시된 결과는 모집단 계수를 통하여 제시된 결과와 비슷한 값으로 도출 되었다. 그리고 제시된 통행시간가치 및 통행시간 신뢰도 가치는 타 연구와 비교하여 약간 높은 수준으로 제시되었다. 그 이유는 승용차 통행자를 대상으로 경로선택 모형을 통하여 통행시간 가치를 산정하였고, 다항일반로짓 모형이 아닌 혼합로짓 모형을 이용하였고, 수도권을 대상으로 분석하였기 때문이라고 언급하였다.

<표 2-14> 경로선택모형을 통한 RR 추정결과 (최영은, 2017)

구분	전체	통근	첨두	단거리	남성
통행시간가치(원/인·시)	30,395	35,745	23,305	28,174	21,807
신뢰도가치(원/인·시)	39,613	49,454	46,658	50,625	35,908
R/R	1.31	1.38	2.00	1.80	1.65

자료: 최영은(2017)

de Jong, Bliemer(2015)의 연구에서는 기존의 연구들을 참고하여 자동차, 트럭, 기차, 대중교통, 항공수단에 대한 RR을 비교·정리하였다. 기존 연구에서는 통행시간 신뢰성 가치를 산정하기 위하여 주로 이용한 방법은 SP 설문조사 데이터를 이용한 로짓모형 구축이었다.

de Jong, Bliemer(2015)의 연구에서 제시한 기존연구들의 통행시간 신뢰성 비율값 중에서 도로부문만 정리하면 다음표와 같다. 신뢰성 비율의 결과 값은 각 연구마다 차이가 존재하기는 하지만 대략 0.3~1.3의 값을 가지는 것으로 나타났다.

<표 2-15> 통행시간 신뢰성 비율 정리: 승용차, 화물차(de Jong, 2015)

연구	모델·데이터형태	국가	RR
Car			
MVA(1996)	Logit on SP data	UK	0.36 - 0.78
Copley et al.(2002)	Logit on SP data	UK	Pilot survey: 1.3
Hensher (2007)	Logit on SP data	Australia	0.3 - 0.4
Eliasson (2004)	Logit on SP data	Sweden	0.30 - 0.95
Mahmassani (2011)	Logit on SP data	USA	NCHRP 431: 0.80 - 1.10 SHRP 2 CO4: 0.40 - 0.90
Expert workshop of 2004	Expert opinion	The Netherlands	0.8
Significance et al. (2013)	Latent class model on SP data	The Netherlands	Commuting: 0.4 Business: 1.1 Other: 0.6
Road freight			
Fowkes (2007)	Logit on SP data	UK	Shippers: 0.38 Own-account: 0.19
Halse et al. (2010)	Logit on SP data	Norway	Shippers: 1.2 Carriers: 0 Overall: 0.11
Significance et al. (2013)	Logit on SP data	The Netherlands	Shippers: 0.9 Carriers: 0.28 Overall: 0.37

자료: de Jong, Bliemer(2015)

통행시간 신뢰성 가치에 대한 선행연구를 종합하여 보면 분석을 위한 자료는 SP 설문조사를 이용하며, 분석방법으로는 로짓모형을 주로 활용한다. 응답자의 선택대안이 통행 경로 또는 이용 수단이며 해당 선택의 효용을 결정짓는 변수로는 통행시간, 통행비용, 통행시간 신뢰성(예상치 못한 지체시간)을 활용한다. 분석결과 통행시간 비율인 RR은 대체적으로 0.5~1.5사이의 값을 보여주는 것으로 나타난다.

<표 2-16> 신뢰성 가치산정 선행연구 고찰 종합

연구	자료	대안	모형	설명변수	RR	
					Min	Max
한국도로공사, 도로교통연구원(2013)	SP	Route	이항로짓	time, cost, reliability	0.52	0.57
한국교통연구원(2016)	SP	통행 수단	MNL	time, cost, reliability	0.87	0.95
최영은(2017)	RP	Route	ML	time, cost, reliabiltiy	1.31	2.00
장수은 외(2008)	SP	통행 수단	MNL	time, cost, 예상치 못한 지체	0.77	0.94
FMTDI(2015) ⁴⁾	-	-	-	-	0.7	0.7
DfT(2017) ⁵⁾	-	-	-	-	0.4	1.4
DMT(2005) ⁶⁾	-	-	-	-	0.8	1.4
de Jong(2015)	선행연구 수집·비교				0.24	1.5

4) FMTDI(2015)는 독일 교통국(Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure)의 Manual for the Federal Transport Infrastructure 지침 참고

5) DfT(2014)는 영국 교통국의 TAG 지침 참고

6) DMT(2005)는 네덜란드 교통국(Dutch Ministry of Transport)의 The value of reliability in transport 참고

제3절 기존연구 시사점 및 본 연구의 기여도

1. 기존연구 시사점

통행시간 신뢰성 지표 추정에 관한 연구들을 살펴보면, 통행시간 신뢰성 지표로 표준편차를 이용하는 경향이 늘고 있다. 통행시간 신뢰성 연구 초기에는 일정모형, 평균-분산 모형 등 다양한 연구가 진행되었다. 그리고 통행시간 신뢰성 지표로 표준편차, Buffer Index, 지연시간 등을 선정하고 추정모형을 개발하였다. 그러나 일정 모형은 개별 통행자의 선호 도착시간, 실제 통행시간을 알아야 한다. 개별 통행자들 자료를 수집해서 분석을 하는 것이 쉽지 않기 때문에 최근의 통행시간 신뢰성 추정 모형으로 평균-분산 모형이 많이 검토 된다. 그리고 통행시간 신뢰성 지표 중에서 산정이 용이하고, 개념이 쉬우며, 적용이 간단한 표준편차를 많이 이용한다. 개별 링크에 대한 통행시간 및 통행속도로 자료등 대용량 자료들이 활용 가능함 따라서 다양한 표준편차 산정 방법이 연구되고 있다. 기존연구들의 통행시간 표준편차 추정 모형을 살펴보면 통행시간 표준편차를 결정짓는 요소로 평균 지체(MD: Mean Delay) 또는 교통량-용량비(V/C)를 활용하며, 추세로 보면 MD를 활용한 모형이 많다.

통행시간 신뢰성 가치에 대한 연구들은 일관되게 SP자료를 이용하여 수단선택 또는 경로선택 모형을 구축 한 후 신뢰성 가치를 추정하였다. 이러한 방법은 가상의 상황을 응답자들에게 주고 선택을 하게 함으로 통행비용 및 통행시간, 통행시간 신뢰성에 대한 상대적 선호를 파악하게 된다. 기존의 연구결과를 살펴보면 통행시간 가치 대비 통행시간 신뢰성의 가치로 정의 되는 통행시간 신뢰성 비율(RR: Reliability Ratio)을 산정하여 비용-편익 분석 등에 신뢰성 가치로 적용하고 있다. 그리고 대체적으로 RR값은 0.5~1.5를 보여주고 있다.

2. 본 연구의 기여도

통행시간 신뢰성에 대한 연구는 최근에 활발히 진행되고 있으며, 화폐 가치화 하여 편익으로 산정해야 한다는 의견이 점차 늘어나고 있다. 이는 개인의 통행비용에 통행시간 신뢰성 비용을 포함해야 한다는 의견과 동일하다. 그 동안은 A에서 B로 이동할 경우 통행시간만을 고려해서 분석했지만 통행시간 변동분도 고려해서 분석해야 조금 더 정밀한 통행행태를 반영할 수 있는 것이다.

과거 Small and Verhoef(2007)의 연구에서 개인의 통행비용에 신뢰성 비용을 추가해야 한다고 제시되어 있었지만 개념적으로만 설명했고 실증적인 연구는 진행하지 않았다. 따라서 본 연구는 국내 연구 중에서 통행비용 항목에 신뢰성 비용을 추가한 최초의 연구가 될 것이다. 그리고 통행시간 신뢰성 지표 추정에 대한 연구도 많지 않기 때문에 통행시간 신뢰성을 추정하는데 중요한 참고문헌이 될 것이다. 통행시간 신뢰성 지표로 표준편차를 고려하기 시작한 것은 불과 몇 년이 되지 않았으며, 그러한 학계 연구 동향에 맞추어 혼잡을 고려한 통행시간 표준편차 모형을 구축하여 통행시간 신뢰성을 추정한다. 그리고 우리나라 자료를 이용한 우리나라 운전자들의 통행특성을 반영한 통행시간 신뢰성 지표 산정모형을 개발할 것이다.

그리고 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 개발에 추가하여 새로이 추가될 수 있는 독립변수를 검토할 것이다. 독립변수는 통행시간 신뢰성에 영향을 줄 수 있는 변수들로 기존의 연구에서는 반영하지 못한 변수들이다. 새로이 추가된 독립변수를 모형에 반영하여 본 연구에서 제시하는 통행시간 신뢰성 지표 산정모형을 제시한다.

본 연구에서 개발한 통행시간 신뢰성 지표 산정 모형과 통행시간 신뢰성 가치를 통하여 통행시간 신뢰성 비용을 산정하여, 다른 통행비용과 비교를 실시한다. 통행비용 중에서 통행시간 신뢰성 비용이 차지하는 비율을 살펴보고 시사점을 제시한다.

제3장 분석방법론

제1절 통행시간 신뢰성 지표 추정 모형: 기본모형

통행시간 신뢰성 지표 추정 모형으로 제시하는 형태는 2차함수 형태에 MD(Mean Delay)를 이용해서 통행시간 표준편차를 산정하는 방법이다. 통행시간 신뢰성 지표로 표준편차를 이용하고, 통행시간 표준편차를 MD(Mean Delay)와 링크길이(L)를 이용해서 산정한다.

MD(Mean Delay)는 평균속도 통행시간에서 신뢰성 기준속도 통행시간을 차감한 지표로 도로의 혼잡을 반영하는 지표이다. MD(Mean Delay)가 크면 평균속도 통행시간과 기준속도 통행시간의 차이가 큰 것이며 이는 혼잡한 상태를 보여주는 것이다. Peer(2012), Geistefeldt(2014), Kowenhoven(2016)의 연구에서 통행시간 표준편차 산정 모형의 독립변수로 MD(Mean Delay)를 이용하였다.

다만 MD(Mean Delay)외에, 추가 독립변수로 링크길이를 모형에 추가하여 통행시간 신뢰성 지표 모형을 구축하였다. 선행연구를 살펴보면 링크길이를 통행시간 신뢰성 지표 추정모형에 독립변수로 활용한 사례가 많다(Arup(2004), Eliasson(2006), Hyder(2008), Macdonald(2009), Peer(2012), Geistefeldt(2014), Kowenhoven(2016), DfT(2017)). MD (Mean Delay; 평균지체)와 링크길이를 독립변수로 하여 링크 통행시간 표준편차를 산정하는 기본모형은 (식 3-1)과 같다.

$$\sigma = f(MD, L) \quad (3-1)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간(분)

L : 링크길이(km)

σ : 링크 통행시간 표준편차(분)

제2절 통행시간 신뢰성 지표 추정 모형: 확장모형

기존의 통행시간 신뢰성 추정 모형에서 활용하는 독립변수는 MD ((Mean Delay), CI(Congestion Index), V/C 등 도로 혼잡도를 반영하는 변수와 링크길이였다. 본 연구에서는 기존 연구에서 반영한 독립변수 외에 변수들을 검토하여 통행시간 신뢰성 지표 추정 모형을 구축한다.

우선 첫 번째로 추가할 변수는 중차량 비율이다. 도로 이용자 개별 행태자료는 차량에 장착된 네비게이션을 통해서 구축되었고 네비게이션 자료에서 추정된 속도 자료는 승용차를 기반으로 구축되었다(네비게이션 장착률은 승용차가 다른 차종에 비하여 월등히 높기 때문). 기존 연구를 살펴보면 승용차의 통행속도는 중차량 비율에 의해서 영향을 받는 것으로 제시하고 있다(국토교통부(2013), Shankar(1998)).

국토교통부(2013)에서는 중차량은 교통류에 영향을 주며, 그 이유로는 첫째 차량크기가 승용차보다 크므로 더 넓은 공간을 차지하고, 둘째 차량운행능력(감속, 가속, 속도유지)이 일반적으로 승용차보다 떨어지고, 셋째 중차량은 승용차 운전자에게 물리적, 심리적 영향을 주기 때문으로 제시하고 있다. 따라서 이와 같은 이유로 인하여 중차량이 승용차 교통류에 들어오면 속도가 떨어지고 차량간격이 커진다고 하였다. 그리고 Shankar, Mannering(1998)의 연구에서는 링크 평균속도, 링크 속도 편차, 환경적 요인, 도로 기하적 요인, 도로 차종 비율은 상호간에 영향을 미친다고 하였다. 특히 중차량(트럭)비율은 링크의 평균속도를 감소시키는 영향을 주는 것으로 제시하였다. Krammes(1986)의 연구에서는 트럭의 승용차 환산계수에 대해서 연구를 하였으며, 트럭으로 인하여 교통흐름에 좋지 않은 영향을 준다고 제시하였다. 트럭은 공기교란, 교통표지가림, 차로 침범 등의 영향으로 도로용량감소에 영향을 준다고 하였다. Webster(1999), Al-Kaisy(2002), Demarchi(2003), Rakha(2007)의 연구에서도 공통적으로 언급하는 내용은 트럭은 교통류 흐름에 영향을 주기 때문에 이를 반영해서 용량을 보정해야 한다고 한다. Lee(2010)의 연구에

서도 트럭의 교통량에 따라서 차로의 교통류비율은 영향을 받는다고 한다. 기존연구를 살펴본 결과 중차량 비율은 승용차 통행속도 더 나아가 링크 통행속도에 영향을 줄 것으로 판단하여 통행시간 신뢰성 지표 추정 모형에 독립변수로 추가한다.

그리고 두 번째로 추가할 변수는 차로수이다. 도로의 차로수에 따라서 교통류의 상태는 다르고, 그로 인하여 도로의 평균통행속도, 통행속도의 변동에 영향을 줄 것으로 보인다. KTDB (2018)의 자료에서도 고속도로 통행시간 산정을 위한 VDF함수 체계는 차로수로 고속도로를 구분하였다. 고속도로를 차로수에 따라서 2차로, 3차로 이상의 2가지 등급으로 구분하여 초기기준속도, 용량, BPR함수 상의 α, β 계수를 달리 부여 하고 있다. KTDB (2018)의 자료에서 제시하는 차로수에 따른 초기속도, 용량, BPR함수 파라미터들을 비교해보면 차로수가 많을수록 혼잡정도를 완화해줄 수 있도록 하고 있다. 즉, 동일한 교통량이 증가하면 차로수가 많은 도로가 혼잡정도가 덜 높아지도록 파라미터를 설정한 것이다. Yang, Zhang(2007)의 연구에서는 차로수에 따라서 도로의 차로당 용량이 달라진다고 제시하였다. 그리고 또한 Yang, Zhang(2008)의 연구에서도 차로수에 따라서 속도-밀도 관계식이 달라진다고 제시하고 있다. 차로수에 따라서 속도-밀도 관계식이 달라지는 이유는 차량의 차로변경 현상이 차로수에 따라서 달리 영향을 주기 때문으로 주장하였다.

$$\sigma = f(MD, L, HR, NL) \quad (3-2)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간(분)

L : 링크길이(km)

HR : 중차량 비율(중차량(버스+화물차) 대수/ 전체 차량수)

NL : 차로수(2차로, 3차로 등)

σ : 링크 통행시간 표준편차(분)

제3절 통행시간 신뢰성 지표 모형 검증 방법

통행시간 신뢰성 지표 모형 검증은 전체 데이터셋 중에서 70%로 모형을 추정하고 모형추정에 이용하지 않은 나머지 30%의 자료를 이용하여 실시한다. 검증을 위한 지표로는 RMSE, MAPE, EC를 활용한다. RMSE는 평균제곱근 오차로 값이 작을수록 모형값과 실측값의 오차가 적다고 판단하면 된다. MAPE는 평균절대오차 백분율로 오차의 평균으로 이해하면 되고, MAPE가 10 이하면 매우 정확한 모형, 20 이하면 비교적 정확한 모형, 50 이상이면 부정확한 모형으로 판단할 수 있다. EC는 균등계수로 1에 근접할수록 정확한 모형으로 볼 수 있다.

그리고 다양한 경우의 자료에 대해서도 추정이 적합하게 되는지 판단하며, 특히 링크길이가 긴 경우에도 모형추정이 적정한지 살펴본다.

①평균제곱오차

$$RMSE = \sqrt{\left[\frac{1}{N} \sum (T_K - T_P)^2\right]} \quad (3-3)$$

②평균절대오차백분율

$$MAPE = \frac{\sum \left| \frac{T_K - T_P}{T_K} \right| \times 100}{N} \quad (3-4)$$

③균등계수

$$EC = 1 - \frac{\sqrt{\sum (T_K - T_P)^2}}{\sqrt{\sum T_K^2} + \sqrt{\sum T_P^2}} \quad (3-5)$$

여기서,

T_K : 실측값

T_P : 예측값

제4장 분석자료

제1절 자료의 선정

1. 통행시간 신뢰성 지표 선정

통행시간 신뢰성 지표를 선정하기 위해서는 링크별, 시간대별 통행시간과 통행속도가 집계된 자료가 아닌 개별 차량의 속도를 파악할 수 있는 자료여야 한다. 통행시간 신뢰성 지표로 통행시간 표준편차를 이용하기 때문에 집계된 자료가 아닌 차량 한 대의 통행속도자료가 필요하다. 개별 차량 한 대의 통행속도를 이용하여 링크의 평균통행시간, 통행시간 표준편차 등을 산정하고 이를 바탕으로 모형을 구축한다. 그리고 통행시간 신뢰성 지표 추정모형을 구축하기 위해서는 이러한 링크 통행자료는 가능한 광범위한 도로와 많은 프로브 차량자료로 축적된 자료가 적절한 것으로 판단된다. 그래서 본 연구에서는 KTDB에서 제공한 뷰티(View-T)1.0자료를 이용하였다.

뷰티(View-T) 1.0은 교통빅데이터 플랫폼으로 확대하여 구축하고, 네비게이션 및 스마트카드 정보를 통합한 뷰티(View-T) 1.0을 구축하였으며 온라인 서비스를 2017년 9월부터 오픈하였다. 뷰티(View-T) 1.0은 국가 전반의 교통데이터를 공공·연구·학교·민간·국민이 편리하고 쉽게 사용할 수 있도록 하며, 교통관련 정보들을 입체적으로 분석할 수 있는 기반을 제공하기 위한 목적으로 개발하였다. 뷰티(View-T) 1.0은 네비게이션 및 스마트카드 정보를 통합하여 교통데이터의 정확도를 높인 것이며, KTDB 랩플랫폼 자료를 이용하여 도로구간별 교통량, 속도 등의 기초 자료를 보완하였다.(뷰티(View-T) 1.0 홈페이지)

본 연구에서는 View-T 1.0구축을 위해서 생성된 속도프로파일 자료를 이용하여 개별링크에 대한 통행자료를 구축하였다. 속도프로파일 자료는 View-T 1.0에서 제시되는 개별 링크에 대한 통행속도, 통행량, 혼잡지표 등을 제시하기 위한 기반자료로 활용된다. 속도프로파일자료는 차량 내 비게이션 자료를 이용하여 월별, 연도별 데이터를 재가공 및 병합과정을 거쳐 구축하며, 구축된 연도별 자료로 구축한다(한국교통연구원, 2018). 본 연구에서는 2015년을 기준으로 구축된 속도프로파일자료를 이용하였으며, 속도프로파일 자료 예시는 다음 <표 4-1>과 같다. 속도프로파일 자료에서 제공하는 링크별로 1시간단위로 구축된 차량속도 분포자료를 이용하여 링크통행시간, 링크통행시간 표준편차 등을 산정하였다.

<표 4-1> View-T 1.0 속도프로파일 자료 예시

항목	예시		비고
링크id	55580028801		11자리 링크구분 코드
속도(km/h)	속도	대수	통행속도 1~150km/h까지 차량대수 제시
	1	1	
	2	1	
	.		
	149	3	
	150	2	
도로등급	101		KTDB 배포자료 기준
시간	1		0~23시까지 링크당 24개 자료
위치	충북 옥천군		읍면동까지 제시
연장(km)	0.522		-
도로명	경부고속도로		-
차로수	2		-
교통량(대/시)	586		3종체계(승용차, 버스, 화물차)
VDF	2		KTDB 배포자료 기준

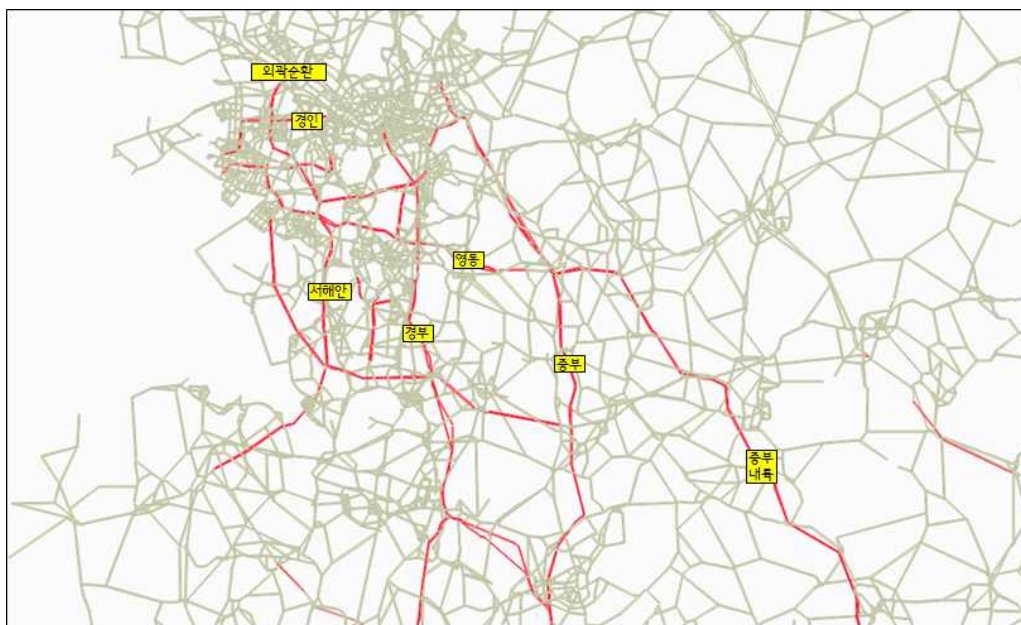
2. 분석 대상구간

본 연구에서 분석대상으로 지정한 도로는 우리나라를 대표하는 고속도로 8개 구간을 선정하였다. 도로의 상징성 및 우리나라의 전체지역을 반영할 수 있도록 연장이 긴 도로를 중심으로 대표고속도로를 선정하였다. 그리고 다양한 교통흐름을 반영할 수 있도록 도시부와 지방부 및 왕복 4~10차로 고속도로를 선정하였다.

<표 4-2> 고속도로 대표구간 연장 및 개통일

도로명	연장(km)	개통일(년,월,일)
경부고속도로	416.1	1970.07.07
경인고속도로	13.4	1968.12.21
서해안고속도로	336.6	1994.07.07
영동고속도로	234.4	1971.12.01
중부고속도로	117.2	1987.12.03
중부내륙고속도로	301.7	2001.09.28
호남고속도로	194.2	1970.12.30
서울외곽순환고속도로	128.0	1991.10.31

자료: wikipedia

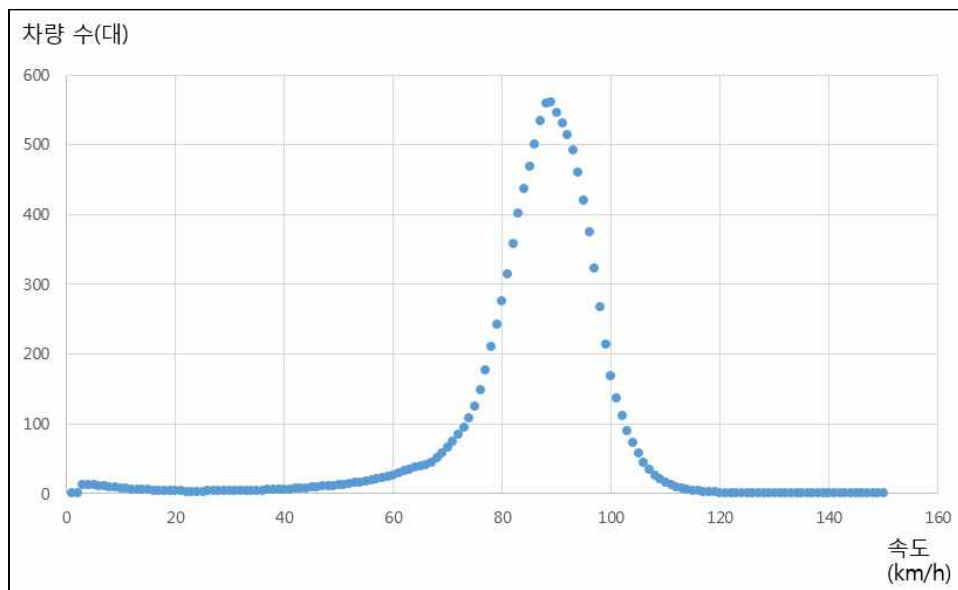


<그림 4-1> 고속도로 대표구간

제2절 분석 자료의 구축방법

1. 통행시간 신뢰성 지표 산정

통행시간 신뢰성 지표를 산정하기 위한 기본 자료인 뷰티(View-T) 1.0의 원시자료 형태는 <그림 4-1>과 같다. 속도가 1부터 150까지 제시되어 있으며, 각 속도로 차량수가 제시되어있다. 1시간단위로 전일(24시간)자료가 있으며 각 링크별로 제시되어 있다.



<그림 4-2> 서울외곽순환 고속도로 중 임의링크 속도별 차량분포(16시)

1개링크 단위로 매시간 통행시간 평균 및 통행시간 표준편차 산정방법은 도수분포표 평균 및 분산 산정 방법을 활용하였다. 그 방법은 다음식과 같다.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^k m_i f_i \quad (4-1)$$

여기서,

\bar{x} : 통행시간 평균

m_i : 통행속도

f_i : 통행속도별 차량수

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^k (m_i - \bar{x})^2 f_i} \quad (4-2)$$

여기서,

\bar{x} : 통행시간 평균

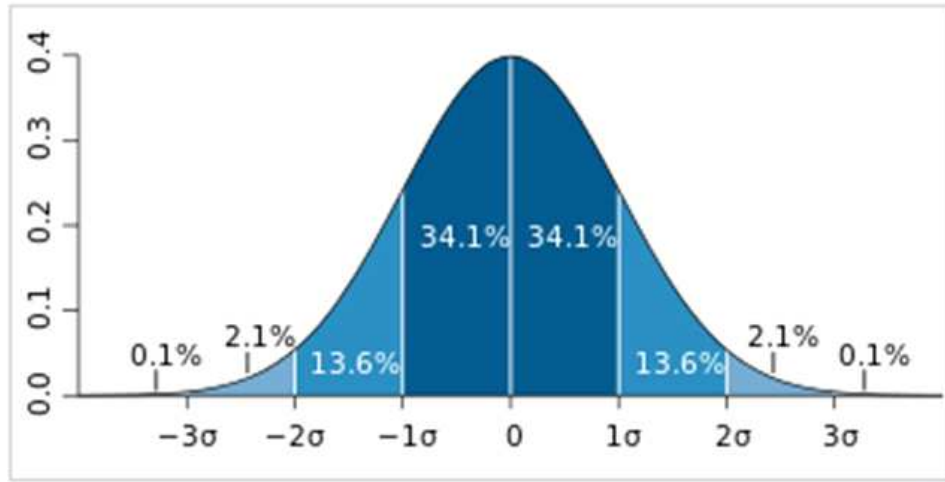
m_i : 통행속도

f_i : 통행속도별 차량수

고속도로나 일반도로의 통행속도 분포를 살펴보면 이상자료(Extreme Value) 들이 존재하고 이러한 이상치를 제거한 후 통행시간 표준편차를 산정해야 한다.

Hyder Consulting(2008), de Jong and Bliemer(2015)의 연구에서도 통행시간 신뢰성 지표로 표준편차 모형을 선정할 때 장점은 실증적으로 관찰이 가능한 점, 통행배정 모형에 적용이 용이한 점, 개별이용자에 대한 선호조사가 불필요한 점이 있다. 반면에 단점은 아웃라이어에 민감하게 반응한다는 점이다. 따라서 이러한 단점을 완화하기 위해서는 이상치 제거가 필수적이다.

Hyder Consulting(2008)의 연구에서는 런던 등 영국의 주요 대도시 10개 구간을 선정하고 해당 구간의 통행시간 자료를 바탕으로 통행시간 신뢰성 지표 산정모형을 구축하였고, 해당 연구에서는 이상치 제거 방법으로 $\mu \pm 4\sigma$ 방법을 이용하였다.



<그림 4-3> 전체 자료 중 $\mu \pm X\sigma$ 가 차지하는 비율

자료:wikipedia

본 연구에서는 이상치 제거 방법으로 Hyder Consulting(2008)에서 적용한 방법을 적용하며 $\mu \pm 3\sigma$ 의 기준치를 이용하였다. 고속도로 구간 속도를 살펴보기 위한 남대식(2009)의 연구에서도 이상치 제거 기준을 $\mu \pm 3\sigma$ 로 하였고, $\mu \pm 3\sigma$ 는 통계적으로 전체 자료의 99.7%를 나타내는 것이므로 이상치 제거의 적절한 방법이라 판단하였다.

<표 4-3> 전체 자료 중 $\mu \pm X\sigma$ 가 차지하는 비율

범위	차지하는 비율	벗어날 확률(개략)
$\mu \pm 1\sigma$	68.27	1/3
$\mu \pm 2\sigma$	95.45	1/22
$\mu \pm 3\sigma$	99.73	1/370
$\mu \pm 4\sigma$	99.99	1/15,787
$\mu \pm 5\sigma$	99.99	1/1,744,278
$\mu \pm 6\sigma$	99.99	1/506,842,372

2. 통행시간 신뢰성 가치 산정

통행시간 신뢰성 지표 산정모형을 구축한 후 이를 금전가치화 하기 위해서는 통행시간 신뢰성 가치가 필요하다. 통행시간 신뢰성 가치는 통행시간가치 대비 통행시간 신뢰성 가치의 비율인 신뢰성 비율(Reliability Ratio: RR)을 이용하여 산정한다. 신뢰성 비율에 대한 선행연구결과를 종합하면 다음 <표 4-3>과 같다.

<표 4-4> 신뢰성비율 산정 결과 종합

연구	구분		RR
도로교통연구원(2013)	업무		0.57
	비업무		0.52
한국교통연구원(2016)	도시부 통행	업무	0.95
		비업무	0.88
	지역간 통행	업무	0.91
		비업무	0.87
최영은(2017)	전체		1.31
	통근목적		1.38
	첨두시간		2.00
장수은(2008), 국토교통부(2009)	지역간	업무	0.77
		비업무	0.82
	도시부		0.94
FMTDI(2015) ⁷⁾	지역간 통행, 승용차		0.7
DfT(2017) ⁸⁾	승용차		0.4
	대중교통		1.4
DMT(2005) ⁹⁾	승용차		0.8
	대중교통		1.4

7) FMTDI(2015)는 독일 교통국(Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure)의 Manual for the Federal Transport Infrastructure 지침 참고

8) DfT(2017)는 영국 교통국의 TAG 지침 참고

9) DMT(2005)는 네덜란드 교통국(Dutch Ministry of Transport)의 The value of reliability in transport 참고

신뢰성 비율에 대한 선행연구 결과를 살펴보면, 국내연구는 업무와 비업무 통행으로 구분하여 산정하였고, 도시부와 지역간 통행을 구분하였다. 해외연구를 살펴보면, 승용차와 대중교통을 구분하여 신뢰성 비율을 산정하였으며, 대중교통에 대한 신뢰성 비율이 더 높은 것을 알 수 있다. DMT(2005)의 연구에 따르면 목적에 구분 없이 한 가지 신뢰성비율을 이용하는 것은 문제는 없지만 세분화되면 더 좋을 것이라고 하였다. 그러나 업무통행은 비업무통행보다 더 높을 것이라고 예상은 되나 어느정도 높은지는 더 살펴보아야 한다고 하였다. 업무의 종류마다 통행시간 신뢰성은 다양하게 나타날 것이며, 이러한 내용들을 반영하여 신뢰성 비율을 산정하려면 추가적인 검토가 필요하다고 하였다.

본 연구에서는 국토해양부(2009)지침을 참고로 하여 지역간 신뢰성비율의 평균인 0.80을 적용한다. 지역간 신뢰성 비율을 적용하는 이유는 서울외곽순환고속도로가 지역간 도로의 특성을 보여주기 때문이다.

통행시간 신뢰성 가치는 장수은(2008)의 연구를 바탕으로 하여 국토해양부(2009)지침에 통행시간 신뢰성 가치 및 비율이 수록되었다. 그 이후 통행시간 신뢰성 가치 연구는 한국도로공사(2013), 한국교통연구원(2016)으로 이어진다. 최신 연구인 한국교통연구원(2016)의 통행시간 신뢰성 비율을 적용할 수 있으나, 통행시간 신뢰성 가치 및 편익에 대해서 최초로 언급하였던 국토해양부(2009)지침의 신뢰성 비율을 적용한다.

<표 4-5> 통행시간 신뢰성가치(2018년)

구분	승용차	버스	화물차
2018년 기준 평균 시간가치(원/대)	15,930	94,752	17,443
신뢰성 비율(RR)	0.8	0.8	0.8
2018년 기준 평균 통행시간 신뢰성가치(원/대)	12,744	75,802	13,954

자료: 국토해양부(2009) 수정

제3절 분석 자료의 구축 결과 및 검토

1. 통행시간 및 통행시간 표준편차 관련성 검토

서울외곽순환고속도로에 대한 기본 통행시간 자료를 이상치 제거 후 시간대별로 평균통행시간과 통행시간 표준편차, 평균통행속도를 살펴본다. 전반적으로 통행시간 표준편차와 평균통행시간은 비례관계에 있는 것을 알 수 있다. 혼잡이 가중될수록 평균통행시간은 늘어나고 통행시간 표준편차도 증가하는 형태를 보인다.

<표 4-6> 서울외곽순환 고속도로 평균통행시간, 통행시간 표준편차

시간대	평균통행시간 (분/km)	통행시간 표준편차	평균 통행속도 (km/h)
0~1시	0.59	0.11	98.95
1~2시	0.59	0.11	98.70
2~3시	0.60	0.12	96.74
3~4시	0.62	0.12	94.75
4~5시	0.63	0.12	93.62
5~6시	0.62	0.11	94.26
6~7시	0.67	0.13	88.03
7~8시	0.76	0.15	80.82
8~9시	0.78	0.16	79.58
9~10시	0.75	0.16	80.63
10~11시	0.75	0.16	79.91
11~12시	0.73	0.15	82.23
12~13시	0.68	0.13	86.23
13~14시	0.69	0.12	86.12
14~15시	0.71	0.13	83.60
15~16시	0.73	0.14	81.89
16~17시	0.75	0.15	80.34
17~18시	0.80	0.17	76.11
18~19시	0.84	0.18	73.24
19~20시	0.78	0.18	77.04
20~21시	0.70	0.14	85.15
21~22시	0.66	0.12	89.91
22~23시	0.64	0.11	92.42
23~24시	0.61	0.11	96.31

2. 신뢰성 기준속도

통행시간 표준편차 산정에 이용되는 주요 독립변수인 CI(Congestion Index), MD(Mean Delay)는 평균통행시간과 기준속도 통행시간을 이용해서 계산한다. 평균통행시간은 자료분석을 통해서 살펴볼 수 있으나, 신뢰성 기준속도는 일정한 값으로 결정을 해야 한다. 그래서 신뢰성 기준속도 적용값에 대해서 검토를 실시한다.

우선 교통수요 분석에 이용되는 초기속도 값은 다음 <표4-7>과 같다. 초기속도는 도시부와 지방부로 구분하고, 차로수에 따라서 다른 속도 값을 적용한다.

<표 4-7> 교통수요 분석에 이용되는 초기속도

도로구분	지역구분	차로수(편도)	초기속도(km/h)
고속 국도	도시부	2차로이하	92.4
	지방부		97.7
	도시부	3차로이상	98.3
	지방부		99.5

자료: 한국교통연구원(2018)

한국교통연구원(2018)에서 제시한 초기속도는 다음과 같은 방향 하에서 산정되었다.

- ①속도자료 이상치 수정은 상한값 기준(제한속도): 60km/h 초과 제한속도의 경우+10km/h, 하한값은 1사분위수를 이용하여 수정함
- ②문헌상 기준속도는 혼잡이 없는 일정 수준 이하의 교통류 상태에서 일반적인 운전자가 통행하는 평균속도로 정의되고 있음. 하지만 교통량과 밀도가 0인 상태는 실제 관측이 불가능하므로, 가장 속도가 높은(혼잡이 없는) 시간대(1시간단위) 선정
- ③교통수요분석의 기준교통속도는 물리적 개념보다는 통행자의 대표(평균) 통행속도를 산정하는 것이 합리적임

④따라서, 최대 비혼잡 시간대 속도자료를 평균하여 초기교통속도를 산정함

서울외곽순환고속도로의 실제 차량 통행행태 자료(View-T자료)를 이용하여 속도분포를 살펴보았다. 100 percentile 속도(최고속도)는 125.1km/h이며, 85 percentile 속도는 약103.9km/h였다. 한국교통연구원 에서 제시하는 초기속도 98.3km/h는 약 67 percentile을 차지하는 것으로 분석되었다.

<표 4-8> 서울외곽순환고속도로 누적%별 통행속도

비율 구분	통행속도(km/h)
100 percentile	125.1
95 percentile	109.4
90 percentile	106.2
85 percentile	103.9
80 percentile	102.2
75 percentile	100.6

Black(2004)의 연구에서는 CI(Congestion Index)를 기반으로 CV(Coefficient of Variation, 표준편차와 통행시간의 비율)를 추정하는 통행시간 신뢰성 지표 모형을 제시하였다. Black(2004)의 연구에서도 CI(Congestion Index)를 산정하기 위해서 신뢰성 기준속도를 설정하였으며, 두가지 방법을 이용하였다. 우선 London Transportation Study(LTS)¹⁰⁾에서 제시하는 속도값을 활용하였으며, 심야시간대의 속도를 측정하여 신뢰성 기준속도로 이용하였다. 본 연구에서도 고속도로의 심야시간대 속도를 살펴보았다.

10) 런던광역권에 대한 교통과 공간계획 및 도시정책을 설계하는 Framework. 고속도로 및 지하철의 운영전략을 수립하며, 대중교통 정책을 수립함

심야시간대(0~6시)의 평균통행속도를 살펴본 결과 96.5km/h로 오전 시간대 보다 더 낮게 분석되었다. 심야시간대의 평균속도가 낮은 이유에 대해서는 KTDB¹¹⁾에서는 다음과 같이 제시하고 있다.

고속도로의 심야시간에는 ①화물차의 통행량이 많고 ②낮에 비하여 운전자의 시거가 짧아지고 반응시간이 길어져 안전운전을 하게 되며 ③낮의 일상적 통행보다는 비일상적 통행이 많아 도로에 익숙하지 않은 운행이 많은 것이 이유일 것으로 추정됨

<표 4-9> 시간대별 평균 통행속도(대표고속도로 전체자료)

시간대	평균 통행속도 (km/h)	시간대	평균 통행속도 (km/h)
0~1시	99.497	12~13시	96.514
1~2시	98.130	13~14시	96.394
2~3시	95.867	14~15시	95.224
3~4시	94.360	15~16시	94.937
4~5시	94.445	16~17시	94.900
5~6시	97.010	17~18시	94.178
6~7시	98.096	18~19시	93.499
7~8시	98.237	19~20시	94.349
8~9시	98.394	20~21시	95.226
9~10시	97.043	21~22시	96.553
10~11시	95.260	22~23시	97.769
11~12시	95.337	23~24시	99.408

심야시간대의 평균속도를 신뢰성 기준속도로 하기에는 비일상적인 통행이 많고, 화물차 통행이 많은 등의 이유로 평범한 속도를 대표할 수 없다고 판단한다. 따라서 본 연구에서는 교통수요 분석에 사용되는 초기 속도 값(98.3km/h)을 신뢰성 기준속도로 활용한다. 링크평균속도가 신뢰성 기준속도 값을 초과하는 링크는 제외¹²⁾하고 통행시간 신뢰성 지표산정모형 자료로 이용하여 통행시간 신뢰성 지표 모형식을 개발한다.

11) KDI(2018), 국가교통DB검토 및 교통부문 쟁점 연구 중 KTDB 검토 의견

12) 평균속도가 기준속도를 초과하면 CI(Congestion Index)는 1보다 작고, MD(Mean Delay)는 음수 값이 도출됨

제5장 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 개발

제1절 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 개발 개요

1. 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 개발 과정

통행시간 신뢰성 지표 산정모형 구축을 위해서 우선 통행시간 신뢰성 지표와 지표를 설명할 수 있는 변수를 살펴본다. 과거의 국내외 선행연구를 바탕으로 통행시간 신뢰성 지표는 통행시간 표준편차로 선정하였다. 그리고 통행시간 신뢰성 지표와 설명변수의 관계를 살펴보고 유의미한 변수를 파악한다. 그리고 설명변수와 통행시간 표준편차의 최적 관계식을 파악한 후 통행시간 신뢰성 지표 산정모형을 구축한다. 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 구축은 고속도로 대표구간 통행자료 중 70%를 이용하며, 나머지 30%자료는 최적 모형 검토단계에서 모형간 검증자료로 활용한다.



<그림 5-1> 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 개발 과정

2. 통행시간 신뢰성 지표 및 설명변수 검토

선행연구를 살펴보면 통행시간 신뢰성 지표로는 크게 두 가지 지표를 이용하며, 이는 통행시간 표준편차와 버퍼타임이다. 통행시간 표준편차는 개별 통행자들의 통행시간을 파악한 후 통계분석을 통해서 파악한다. 버퍼타임은 전체 통행자들의 통행시간 분포를 파악한 후 통행시간 중 상위 95%¹³⁾ 통행시간과 평균통행시간 또는 중위통행시간의 차이로 계산한다. 최근 연구 흐름을 살펴보면 통행시간 표준편차를 통행시간 신뢰성 편익 산정의 기준 지표로 활용하는 사례가 늘고 있으며(Mackie, 2014), 교통 시설 운영 평가지표로 활용한 사례도 있다(Bhourri, 2017). 버퍼타임은 주로 미국등의 국가에서 교통운영 평가지표로 활용하고 있으나, 버퍼타임 추정식은 아직 연구된 바 없다. 즉, 버퍼타임은 도로 운영 평가지표로 활용되나, 편익 등의 화폐가치화에 대해서는 아직 한계가 있는 것으로 판단된다.

최근의 연구추세, 활용성 등을 감안할 때 통행시간 신뢰성 지표로 통행시간 표준편차를 이용하며, 통행시간 표준편차 추정모형 개발하여 통행시간 신뢰성을 금전적 가치로 환산 한다. 기존의 연구에서 통행시간 표준편차는 도로의 혼잡도를 반영하는 변수를 독립변수로 하여 모형식을 구축한다. 다만 도로의 혼잡도를 반영하는 변수는 대표적으로 CI (Congestion Index), MD(Mean Delay), V/C(Volume Capacity Ratio)가 이용된다. CI는 평균속도 통행시간을 기준속도 통행시간으로 나눈 값이며, MD는 평균속도 통행시간과 기준속도 통행시간의 차이이다. CI, MD는 작은 값은 혼잡이 덜한 구간, 높은 값은 혼잡이 극심한 구간으로 파악할 수 있다. 그리고 도로의 혼잡도를 반영하는 변수 외에 통행거리를 독립변수로 이용하는 모형식이 다수 존재한다. 본 연구에서는 통행시간 표준편차를 추정하는 독립변수로 CI, MD, V/C, 링크길이를 살펴본다.

13) 버퍼타임을 최초로 언급한 Wunderlich(2000)의 연구에서 버퍼타임(약속된 시간에 늦지 않게 미리 출발해야하는 시간)은 한달에 1번정도 지각하는 통행시간으로 제시하였다. 20일 중 1번, 5% 정도를 지각하는 통행시간을 버퍼타임으로 제시하였으며, 이는 향후 버퍼타임 연구에서 총 통행시간의 상위 95%를 정하는 기준이 되었다.

제2절 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 구축

1. 통행시간 신뢰성 지표와 독립변수 관계 검토

1) 상관관계수 파악

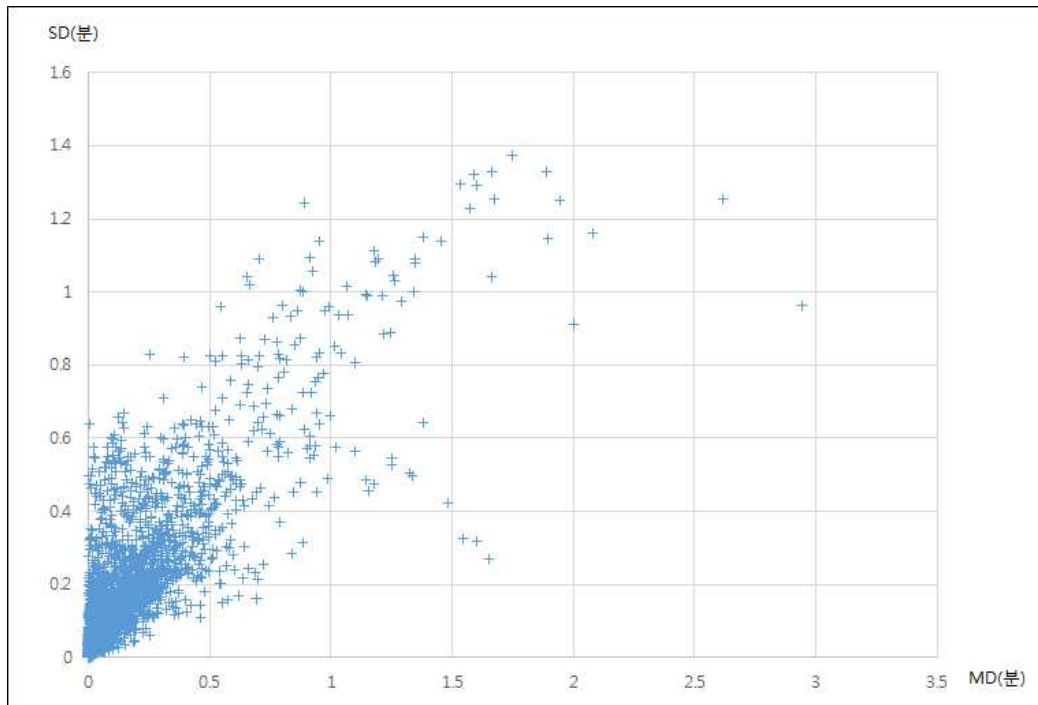
통행시간 신뢰성 지표는 통행시간 표준편차로 하며, 선행연구를 바탕으로 통행시간 표준편차를 설명하는 변수로는 CI(Congestion Index), MD(Mean Delay), V/C(Volume Capacity Ratio), 링크길이(Link length), 중차량 비율(Heavy-vehicle Ratio)로 설정하였다. 이들 변수간의 상관관계를 파악하여, 통행시간 신뢰성 지표 산정모형의 기본식 구축을 위한 독립변수를 선정하였다.

<표 5-1> 통행시간 표준편차와 독립변수 상관관계수

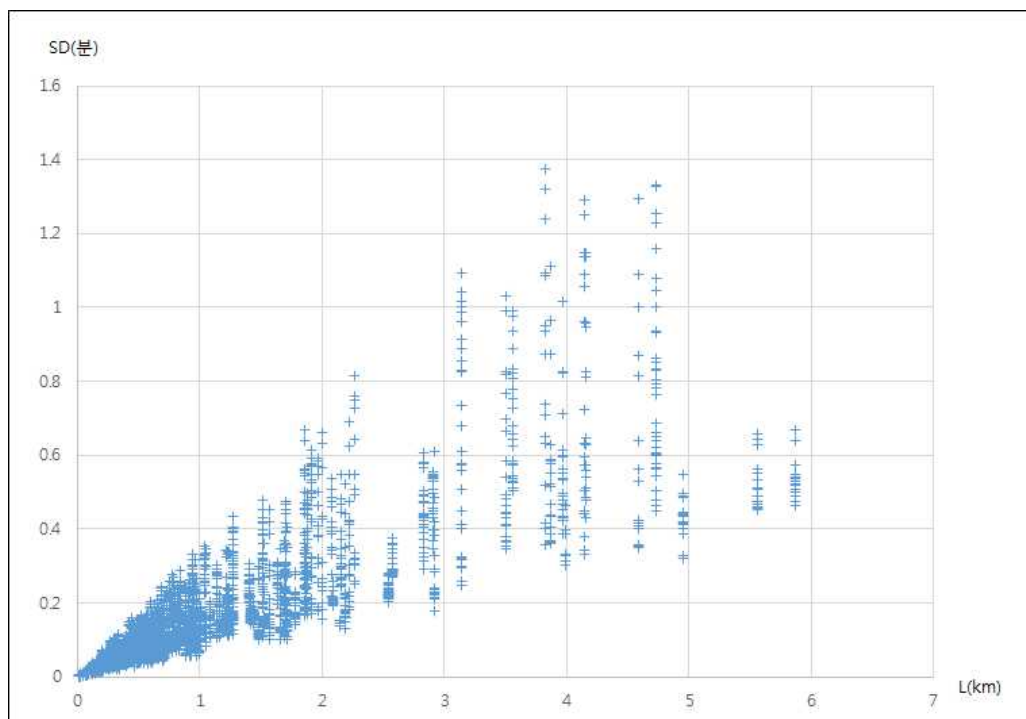
	SD	CI	MD	V/C	L	HR
SD	1					
CI	-0.003	1				
MD	0.592	0.457	1			
V/C	0.029	0.390	0.281	1		
L	0.930	-0.083	0.500	0.030	1	
HR	0.071	-0.257	-0.099	-0.206	0.053	1

* 모든 상관관계수가 0.01 수준에서 유의함

통행시간 표준편차와 독립변수들의 상관관계수를 살펴보면 통행시간 표준편차와 상관성이 높은 변수는 MD(Mean Delay), 링크길이(Link length)로 파악된다. 통행시간 표준편차와 MD(Mean Delay), 링크길이(Link length)는 양의 상관관계로 높은 상관관계수 값을 보인다. 이는 MD가 클수록, 링크길이가 길수록 통행시간 표준편차는 높은 값을 보이는 것으로 나타났다. 통행시간 표준편차와 MD(Mean Delay), 링크길이(Link length)의 관계는 <그림 5-1, 5-2>를 통해 더 자세히 살펴볼 수 있다.



<그림 5-2> 통행시간 표준편차(SD)와 MD 산포도



<그림 5-3> 통행시간 표준편차(SD)와 링크길이(L) 산포도

2) 로그변환 후 상관계수 파악

통행시간 표준편차와 CI(Congestion Index), MD(Mean Delay), V/C(Volume Capacity Ratio), 링크길이(Link length), 중차량 비율(Heavy-vehicle Ratio)의 관계를 더 심화하여 살펴보고자 로그변환을 통하여 변수간의 상관관계를 파악하였다. 통행시간 표준편차와 CI(Congestion Index), MD(Mean Delay), V/C(Volume Capacity Ratio), 링크길이(Link length), 중차량 비율(Heavy-vehicle Ratio)에 'LOG10'을 취한 후 변수간 상관계수 값을 살펴보았다.

<표 5-2> 통행시간 표준편차와 설명변수 상관계수: 로그변환 후

	SD	CI	MD	V/C	L	HR
SD	1					
CI	0.073	1				
MD	0.714	0.513	1			
V/C	0.064	0.239	0.205	1		
L	0.963	-0.072	0.661	0.066	1	
HR	0.078	-0.158	-0.075	0.191	0.062	1

* 모든 상관계수가 0.01 수준에서 유의함

로그변환 후 통행시간 표준편차와 독립변수 상관계수를 살펴보면 통행시간 표준편차와 상관성이 높은 변수는 여전히 MD(Mean Delay), 링크길이(Link length)로 파악된다. 통행시간 표준편차와 MD(Mean Delay), 링크길이(Link length)는 양의 상관관계로 높은 상관계수 값을 보인다. 이는 MD가 클수록, 링크길이가 길수록 통행시간 표준편차는 높은 값을 보이는 것으로 나타났다. 로그변환 후 통행시간 표준편차와 MD, 링크길이가 높은 상관계수값을 보이므로, 로그모형도 추가적으로 검토한다.

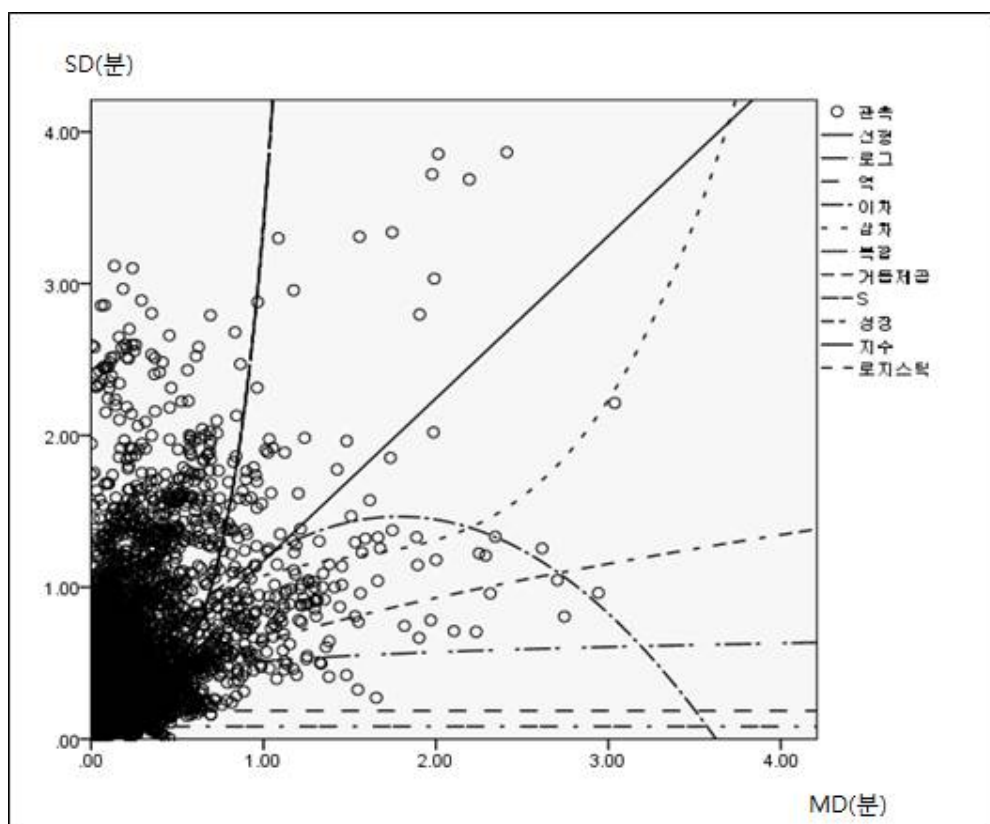
2. 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 기본식

1) 통행시간 표준편차와 MD 관계식

통행시간 표준편차를 종속변수로 하고, MD를 독립변수로 하여 최적 관계식을 살펴보면 선형, 이차·삼차함수, Power함수 모형이 적합한 것으로 파악된다.

<표 5-3> 통행시간 표준편차(SD)와 MD 관계식 요약

모형	R-Square	F	모형	R-Square	F
선형	0.350	12507.8	복합	0.244	7496.8
로그	0.262	8250.9	Power	0.508	24004.6
역	0.000	1.9	S	0.000	6.9
이차	0.384	7227.8	성장	0.244	7496.8
삼차	0.391	4962.0	지수	0.244	7496.8



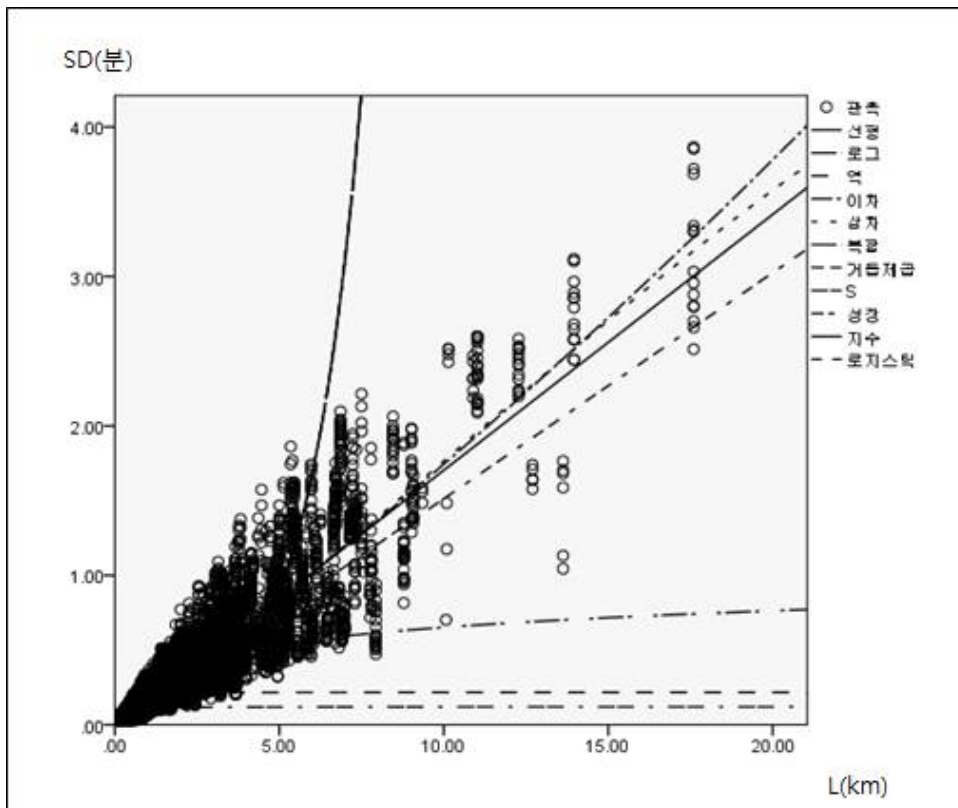
<그림 5-4> 통행시간 표준편차(SD)와 MD 관계식 검토

2) 통행시간 표준편차와 링크길이 관계식

통행시간 표준편차를 종속변수로 하고, 링크길이를 독립변수로 하여 최적 관계식을 살펴보면 선형, 이차·삼차함수, Power함수가 적합한 것으로 파악된다.

<표 5-4> 통행시간 표준편차(SD)와 링크길이 관계식 요약

모형	R-Square	F	모형	R-Square	F
선형	0.865	148917.6	복합	0.558	29310.8
로그	0.483	21671.6	Power	0.928	300687.1
역	0.055	1351.4	S	0.383	14397.1
이차	0.866	75278.7	성장	0.558	29310.8
삼차	0.867	50264.0	지수	0.558	29310.8



<그림 5-5> 통행시간 표준편차(SD)와 링크길이 관계식 검토

통행시간 표준편차와 이를 추정하는 모형의 독립변수인 MD와 링크길이간의 관계식은 선형, 2차함수, Power 함수 형태가 적합한 것으로 보인다.

3) 통행시간 신뢰성 지표 산정 기본식

앞 절에서는 통행시간 표준편차와 평균지체(Mean Delay), 링크길이가 서로 상관성이 높으며, 이를 바탕으로 모형을 구축하기로 하였다. 그리고 개별 독립변수와 적합한 관계식을 검토한 결과 1차선형, 2차함수, 파워함수 등이 적합한 것으로 나타났다. 이러한 결과를 바탕으로 통행시간 신뢰성 지표(통행시간 표준편차) 기본식을 구축하였다.

우선 1차 선형함수를 기본 형태로 하는 모형식을 구축하였다. 통행시간 표준편차와 MD(Mean Delay)간의 관계가 선형관계일 경우, 또는 통행시간 표준편차와 링크길이가 선형관계일 경우 적합한 모형으로 예상된다. 선행연구 중에서는 Hellinga(2011)의 연구에서 통행시간을 독립변수로 하여 통행시간 신뢰성 지표 추정모형을 구축한 사례가 있다. 1차 선형함수 형태의 모형은 다음식과 같다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma L \quad (5-1)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

σ : 링크 통행시간 표준편차

α, β, γ : 파라미터

MD(Mean Delay)와 링크길이(L)를 독립변수로 하는 이차 함수형태의 통행시간 신뢰성 추정 모형을 구축하였다. 이는 MD(Mean Delay)와 통행시간 표준차간의 관계가 이차함수관계일 때 적합할 것으로 판단된다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 \quad (5-2)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간(분)

L : 링크길이(km)

σ : 링크 통행시간 표준편차(분)

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta$: 파라미터

MD(Mean Delay)와 링크길이(L)를 독립변수로 하는 Power 함수형태의 통행시간 신뢰성 추정 모형을 구축하였다. 이는 MD(Mean Delay)와 통행시간 표준차간의 관계가 선형관계가 아닌 지수관계일 때 적합할 것으로 판단된다.

$$\sigma = \alpha \cdot MD^{\beta} \cdot L^{\gamma} \quad (5-3)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간
 L : 링크길이
 σ : 링크 통행시간 표준편차
 α, β, γ : 파라미터

MD(Mean Delay)와 링크길이(L)를 독립변수로 하는 로그함수형태의 통행시간 신뢰성 추정 모형을 구축하였다. 이는 MD(Mean Delay)와 통행시간 표준차간의 관계가 로그로 변환한 후 선형관계일 때 적합할 것으로 판단된다.

$$\text{Log}\sigma = \alpha + \beta \text{LOG}(MD) + \gamma \text{LOG}(L) \quad (5-4)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간
 L : 링크길이
 σ : 링크 통행시간 표준편차
 α, β, γ : 파라미터

본 연구에서 제시하는 4가지 모형(2차함수, 1차선형, Power함수, 로그함수) 외에 기존연구에서 제시하는 모형도 검토를 실시한다. 우선 영국의 TAG에서 제시하는 모형을 살펴본다. 영국 TAG의 모형식은 CI(Congestion Index)와 링크길이, 평균통행시간을 통해서 통행시간 표준편차를 산정하는 방법이다. 기본적 모형은 파워함수 형태에 통행시간을 곱하여 통행시간 표준편차를 산정하는 모형이다.

$$\sigma = \alpha CI^\beta L^\gamma TT \quad (5-5)$$

여기서,

CI : 평균속도 통행시간/기준속도 통행시간

L : 링크길이

TT : 평균통행시간

σ : 링크 통행시간 표준편차

α, β, γ : 파라미터

독일 FMTDI(Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure)에서 제시하는 모형식은 v/c 를 이용하여 통행시간 표준편차를 산정한다. 모형의 기본형태는 Power함수이며, v/c 가 0.7이하인 링크는 통행시간 표준편차를 0으로 하였다.

$$\sigma = \alpha(v/c - 0.7)^\beta \quad (5-6)$$

여기서,

v/c : 교통량-용량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

α, β : 파라미터

Kouwenhoven(2016)에서 제시하는 모형식 기본형태는 1차선형 함수이다. Kouwenhoven(2016)이 제시하는 모형은 MD(Mean Delay)와 링크길이를 통해서 통행시간 표준편차를 산정하는 방법이다. 다만 MD(Mean Delay)파트를 2개로 구분하여, 선형관계식과 LOG선형 관계식으로 구분하였다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma \text{LOG}(MD + 1) + \delta L \quad (5-7)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: 파라미터

3. 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 구축결과

통행시간 표준편차와 다양한 독립변수들의 상관계수, 적합한 함수형태를 살펴본 결과 선형함수, 이차함수, Power함수, LOG 함수가 적합한 것으로 판단된다. 이러한 모형을 바탕으로 통행시간 표준편차 산정모형의 기본식 형태를 결정하고 각 독립변수들의 파라미터를 추정하였다.

1) 1차 선형

1차 선형함수의 기본함수 모형 형태는 다음과 같으며, 각 변수들의 파라미터를 추정한 결과는 <표 5-5>에 제시되어 있다. 1차 선형함수의 R^2 는 0.887로 도출됐으며, 각 변수들의 파라미터는 모두 통계적으로 유의한 것으로 파악된다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma L \quad (5-8)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

σ : 링크 통행시간 표준편차

α, β, γ : 파라미터

<표 5-5> 1차 선형함수-A모형 계수 추정결과 및 결정계수

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	-0.015	0.001	-18.213	0.000
β	0.305	0.005	66.089	0.000
γ	0.156	0.000	331.179	0.000
R^2 : 0.887				

2) 2차함수

2차함수의 기본함수 모형 형태는 다음과 같으며, 각 변수들의 파라미터를 추정한 결과는 <표 5-6>에 제시되어 있다. 추정된 파라미터 결과를 보면 모두 통계적으로 유의하게 추정되었다. 평균지체 변수에 대한 파라미터 추정 결과는 0.373, 평균지체 제곱에 해당하는 파라미터는 -0.047로 추정되었다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 \quad (5-9)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta$: 파라미터

<표 5-6> 2차함수-A모형 계수 추정결과 및 결정계수

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	-0.005	0.001	-6.016	0.003
β	0.373	0.008	45.244	0.000
γ	-0.047	0.006	-8.468	0.000
δ	0.137	0.001	149.908	0.000
η	0.002	0.000	24.093	0.000

R^2 : 0.889

이차함수 모형의 R^2 는 0.889로 도출됐으며, 결정계수가 다른 모형과 비슷하거나 약간 높은 수준으로 분석되었다.

3) Power함수

Power함수의 기본함수 모형 형태는 다음과 같으며, 각 변수들의 파라미터를 추정한 결과는 <표 5-7>에 제시되어 있다. 추정된 파라미터 결과를 보면 모두 통계적으로 유의하게 추정되었다. 평균지체 변수에 대한 파라미터 추정 결과는 0.108, 링크길이에 해당하는 파라미터는 0.960으로 추정되었다.

$$\sigma = \alpha \cdot MD^{\beta} \cdot L^{\gamma} \quad (5-10)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

σ : 링크 통행시간 표준편차

α, β, γ : 파라미터

<표 5-7> Power함수모형 계수 추정결과 및 결정계수

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	0.219	0.001	223.469	0.000
β	0.108	0.002	49.091	0.000
γ	0.960	0.003	309.677	0.000
R^2 : 0.886				

Power함수의 R^2 는 0.886으로 도출됐으며, 결정계수가 다른 모형과 유사하게 추정되었다.

4) LOG함수

LOG함수의 기본함수 모형 형태는 다음과 같으며, 각 변수들의 파라미터를 추정한 결과는 <표 5-8>에 제시되어 있다. 추정된 파라미터 결과를 보면 모두 통계적으로 유의하게 추정되었다. 평균지체 변수에 대한 파라미터 추정 결과는 0.101, 링크길이에 해당하는 파라미터는 0.970으로 추정되었다.

$$\text{Log}\sigma = \alpha + \beta \text{LOG}(MD) + \gamma \text{LOG}(L) \quad (5-11)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

σ : 링크 통행시간 표준편차

α, β, γ : 파라미터

<표 5-8> Power함수모형 계수 추정결과 및 결정계수

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	-0.675	0.003	-266.444	0.000
β	0.101	0.002	62.585	0.000
γ	0.907	0.002	403.559	0.000
R^2 : 0.939				

LOG함수의 R^2 는 0.939로 매우 높게 도출됐으며, 각 변수들의 파라미터 유의확률도 높게 추정된것으로 파악된다. LOG함수의 기본식을 살펴보면 로그변환을 하지 않았을 경우 1차선형 함수와 기본식은 동일하다.

5) 영국모형식

영국 TAG에서 제시하는 통행시간 표준편차 산정을 위한 모형 형태는 다음과 같으며, 각 변수들의 파라미터를 추정한 결과는 <표 5-9>에 제시되어 있다. 영국모형식의 참고할 점은 도로 혼잡도를 반영하는 지표 ‘CI’를 이용하여 추정한다는 점과, 평균통행시간을 통해서 통행시간 표준편차를 산정한다는 점이다. 그리고 평균통행시간은 지수관계 등으로 변환하지 않고 α 를 통해서 선형관계를 유지한다는 점이다. 이는 통행시간이 통행시간 표준편차에 높은 영향을 주기 때문으로 판단하여 모형의 기본식을 이와 같이 구축한 것으로 판단된다.

$$\sigma = \alpha CI^{\beta} L^{\gamma} TT \quad (5-12)$$

여기서,

CI : 평균속도 통행시간/기준속도 통행시간

L : 링크길이

TT : 평균통행시간

σ : 링크 통행시간 표준편차

α, β, γ : 파라미터

<표 5-9> 영국모형식 계수 추정결과 및 결정계수

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	0.217	0.001	197.273	0.000
β	0.219	0.015	14.581	0.000
γ	0.082	0.003	26.452	0.000
R^2 : 0.889				

영국모형식의 R^2 는 0.889로 도출됐으며, 각 변수들의 파라미터는 모두 통계적으로 유의한 것으로 분석되었다.

6) 독일모형식

독일 FMTDI(2015)에서 제시하는 통행시간 표준편차 산정을 위한 모형 형태는 다음과 같으며, 각 변수들의 파라미터를 추정한 결과는 <표 5-10>에 제시되어 있다.

독일모형식의 참고할 점은 도로 혼잡도를 반영하는 지표인 V/C를 이용하여 추정한다는 점과, V/C에 따라서 일정 기준 이하에서는 통행시간 표준편차를 산정하지 않는다는 점이다. 그리고 독일 FMTDI(2015)에서는 V/C기준이 0.75이나, 본 연구에서는 0.5로 하였다. 그 이유는 독일과 동일하게 0.75를 적용하여 분석하였으나, 모형추정이 되지 않았으며, V/C기준을 0.05씩 하향시키며 모형을 분석하였고, 그중에서 가장 추정이 잘된 V/C기준이 0.5였다.

$$\sigma = \alpha(v/c - 0.5)^\beta \quad (5-13)$$

여기서,

v/c : 교통량-용량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

α, β : 파라미터

<표 5-10> 독일모형식 계수 추정결과 및 결정계수

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	0.229	0.010	20.818	0.000
β	0.076	0.017	4.524	0.000
R^2 : 0.03				

독일모형식의 R^2 는 0.03으로 매우 낮게 도출됐으며, 각 변수들의 파라미터는 모두 통계적으로 유의한 것으로 파악되나, 모형은 전반적으로 통행시간 표준편차 산정에 적합하지 않은 것으로 판단된다.

7) Kouwenhoven모형식

Kouwenhoven(2016)에서 제시하는 통행시간 표준편차 산정을 위한 모형 형태는 다음과 같으며, 각 변수들의 파라미터를 추정한 결과는 <표 5-11>에 제시되어 있다. Kouwenhoven(2016) 모형식은 기본적으로 1차 선형관계식이나 중간에 MD+1에 로그를 취한 계산식이 포함된다. 추정된 파라미터 결과를 보면 모두 통계적으로 유의하게 추정되었다. 평균지체 변수에 대한 파라미터 추정 결과는 0.350, 링크길이에 해당하는 파라미터는 0.156으로 추정되었다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma \text{LOG}(MD+1) + \delta L \quad (5-14)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$: 파라미터

<표 5-11> Kouwenhoven모형식 계수 추정결과 및 결정계수

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	-0.014	0.001	-16.503	0.02
β	0.350	0.022	16.160	0.000
γ	-0.153	0.072	-2.133	0.033
δ	0.156	0.000	318.331	0.000
R^2 : 0.887				

Kouwenhoven 함수의 R^2 는 0.887로 도출됐으며, 결정계수가 다른 모형과 비슷하거나 약간 높은 수준으로 분석되었다.

제3절 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 검증

1. 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 검증

본 연구에서 제시하는 4개 모형(1차선형, 2차함수, 파워함수, 로그함수)과 기존연구검토를 통해 추가한 3개 모형(영국모형식, 독일모형식, Kouwenhoven)을 구축하였다. R^2 과 개별파라미터에 대한 통계적 유의도만으로는 어떠한 모형이 적합하다 판단할 수 없으므로, 실측자료를 이용하여 검증을 실시한다.

검증은 모형추정에 이용하지 않은 나머지 30%의 자료를 이용하여 실시하며, 검증을 위한 지표로는 RMSE, MAPE, EC를 활용한다. RMSE는 평균제곱근 오차로 값이 작을수록 모형값과 실측값의 오차가 적다고 판단하면 된다. MAPE는 평균절대오차 백분율로 오차의 평균으로 이해하면 되고, MAPE가 10 이하면 매우 정확한 모형, 20 이하면 비교적 정확한 모형, 50 이상이면 부정확한 모형으로 판단할 수 있다. EC는 균등계수로 1에 근접할수록 정확한 모형으로 볼 수 있다.

통행시간 신뢰성 지표 산정모형 검증결과 우수한 모형으로 판단되는 모형은 2차 선형함수 모형과, Power함수 모형, 영국모형식이다.

<표 5-12> 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 검증 결과-1

구분	RMSE	MAPE	EC
1차 선형함수	0.103	30.887	0.959
2차함수	0.101	28.669	0.960
파워함수	0.104	28.135	0.958
로그함수	0.109	29.147	0.949
영국모형식	0.100	27.692	0.960
독일모형식	0.343	117.351	0.139
Kouwenhoven	0.103	30.614	0.959

통행시간 신뢰성 지표 산정모형 검증을 실측자료 중에서 통행시간 표준편차가 낮은값(15%), 높은값(15%)으로 구분하여 2차 검증을 실시하였다. 통행시간 표준편차로 구분한 이유는 모형의 종속변수이기 때문이며 궁극적으로 통행시간 표준편차를 추정하기 위해서 모형을 구축했기 때문이다. 그리고 통행시간 표준편차가 낮은 구간 혹은 높은 구간에 적합한 모형이 따로 있는가에 대한 의문을 해소하기 위함이다.

통행시간 신뢰성 지표 산정모형 검증결과 통행시간 표준편차가 낮을 때에는 Power함수 모형과, 로그함수 모형, 영국모형식이 우수한 것으로 보이며, 표준편차가 높을 때에는 2차 선형함수 모형과, 파워함수 모형, 영국모형식이 적합한 것으로 분석되었다.

<표 5-13> 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 검증 결과-2

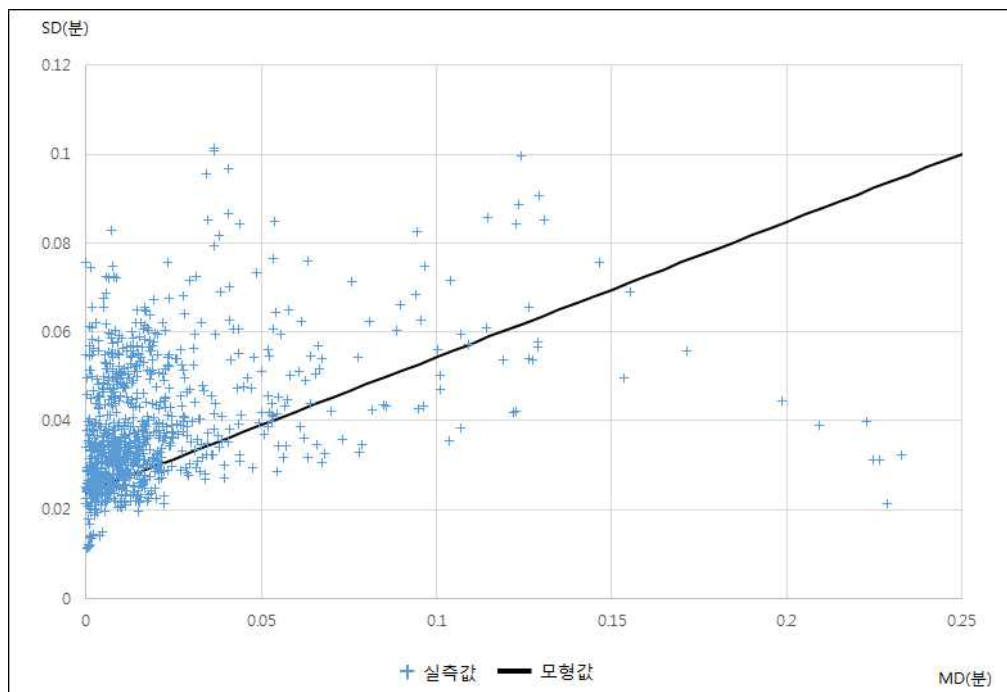
		RMSE	MAPE	EC
통행시간 표준편차 낮은 값들(15%)	1차 선형함수	0.023	33.767	0.931
	2차 선형함수	0.022	29.460	0.941
	파워함수	0.021	28.713	0.944
	로그함수	0.021	29.221	0.946
	영국모형식	0.020	28.151	0.943
	독일모형식	0.079	149.442	0.406
	Kouwenhoven	0.023	33.289	0.933
통행시간 표준편차 높은 값들(15%)	1차 선형함수	0.143	28.055	0.960
	2차 선형함수	0.141	27.908	0.960
	파워함수	0.145	27.566	0.959
	로그함수	0.152	28.911	0.949
	영국모형식	0.140	27.234	0.960
	독일모형식	0.478	85.331	0.128
	Kouwenhoven	0.143	27.984	0.960

2. 실측자료 산포도와 모형결과 비교

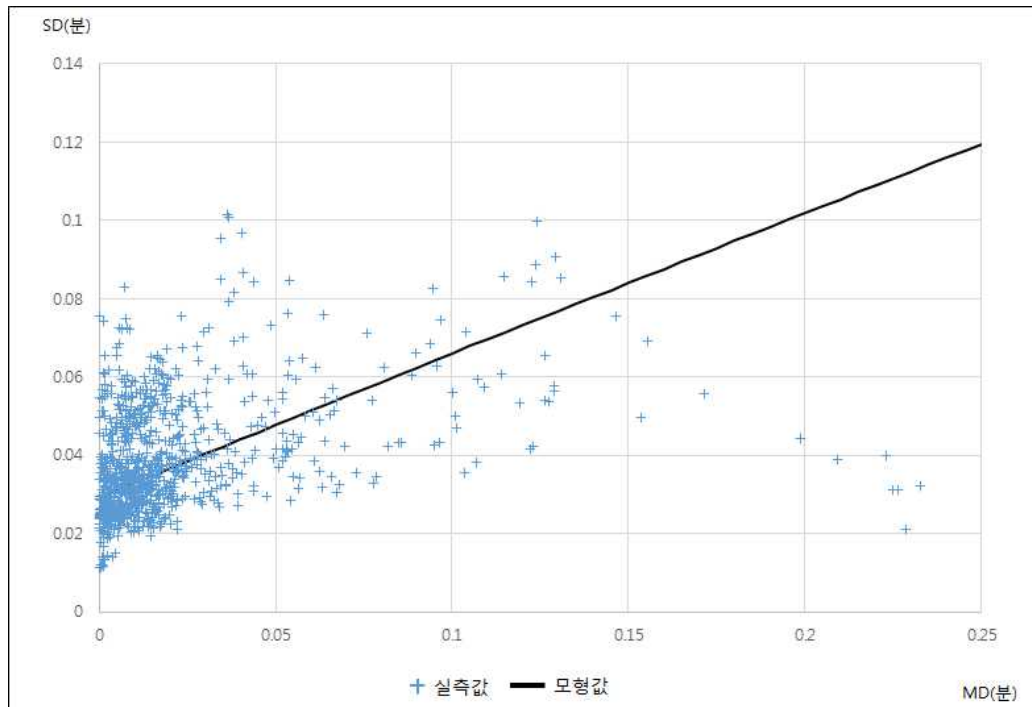
본 연구에서 구축한 통행시간 신뢰성 지표 산정모형(1차 선형함수, 2차함수, 파워함수, 로그선형함수)에 대해서 통계적 검정을 실시하였으나, 다양한 상황에서 모형 추정이 적합한지 살펴보았다. 다양한 상황은 링크길이로 구분하였으며, 링크길이가 짧은 경우(0.2~0.3km), 그리고 긴 경우(3~14km)로 구분하여 살펴보았다.

1) 단거리 링크

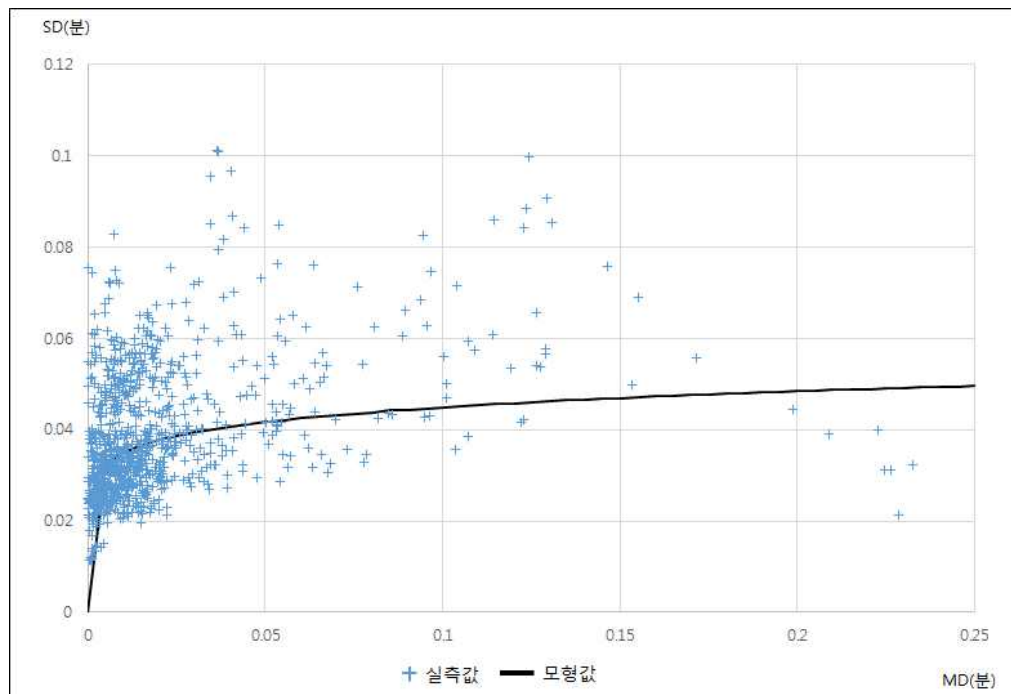
단거리 링크는 링크길이가 0.2~0.3km로 비교적 짧은 구간에서 각 모형의 추정이 어떤 형태를 갖는지 살펴보았다. 하지만 단거리 구간이라서 세가지 모형에 대한 차이가 불분명하였다. 이는 링크길이가 짧고, MD값도 낮기 때문에 모형에서 추정되는 통행시간 표준편차 값이 모형간 차이가 적기 때문이다.



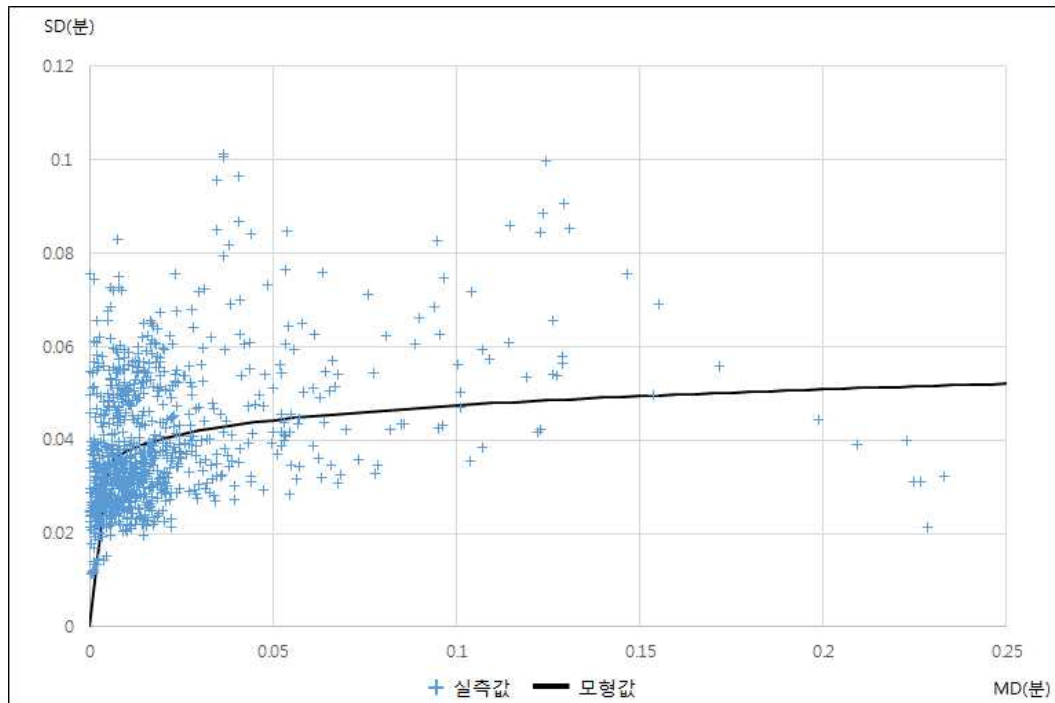
<그림 5-6> 실측값과 모형값 비교: 단거리-1차선형 함수



<그림 5-7> 실측값과 모형값 비교: 단거리-2차 함수



<그림 5-8> 실측값과 모형값 비교: 단거리-파워 함수

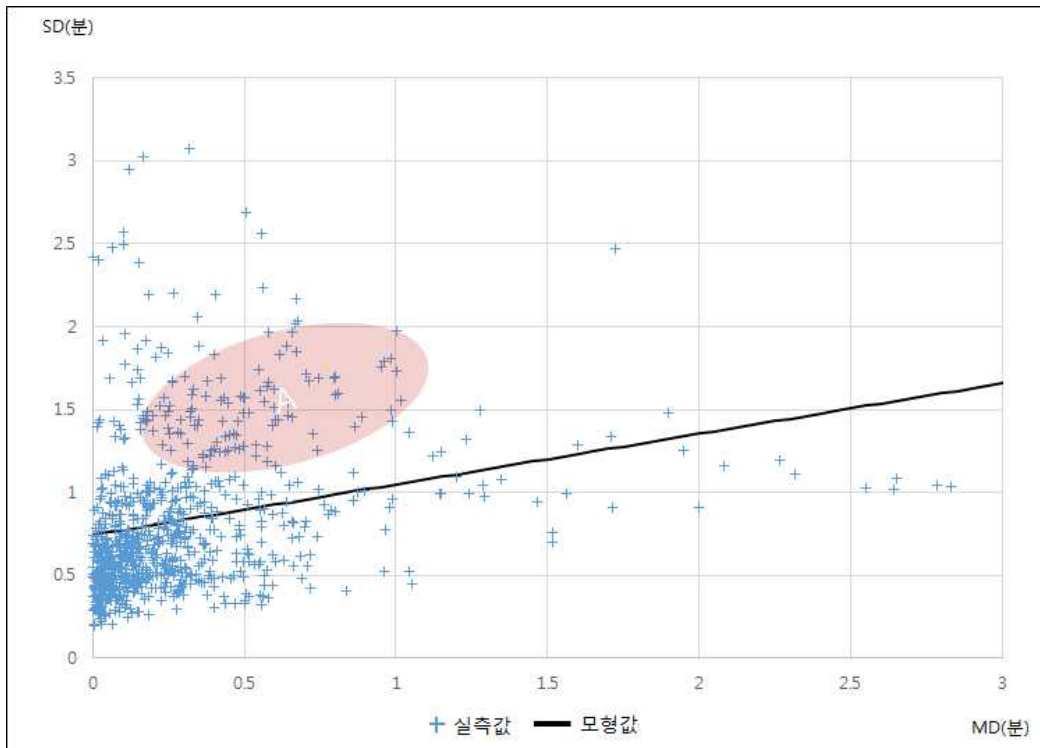


<그림 5-9> 실측값과 모형값 비교: 단거리-로그선형 함수

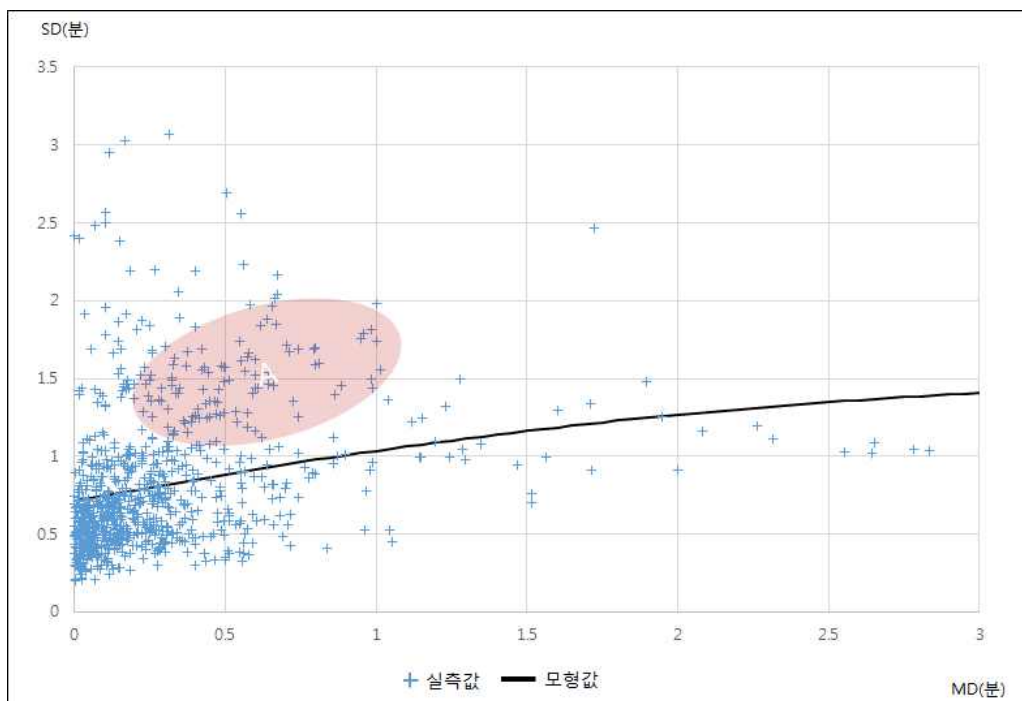
2) 장거리 링크

장거리 링크는 링크길이가 3~14km로 비교적 긴 구간에서 각 모형의 추정이 어떤 형태를 갖는지 살펴보았다. 1차 선형함수는 MD가 증가할수록 통행시간 표준편차도 증가하는 형태를 보인다. 2차함수는 MD가 증가할수록 통행시간 표준편차도 증가하는 형태를 보이나, 오목곡선형태로 표준편차 증가율은 감소하는 것으로 추정되었다.

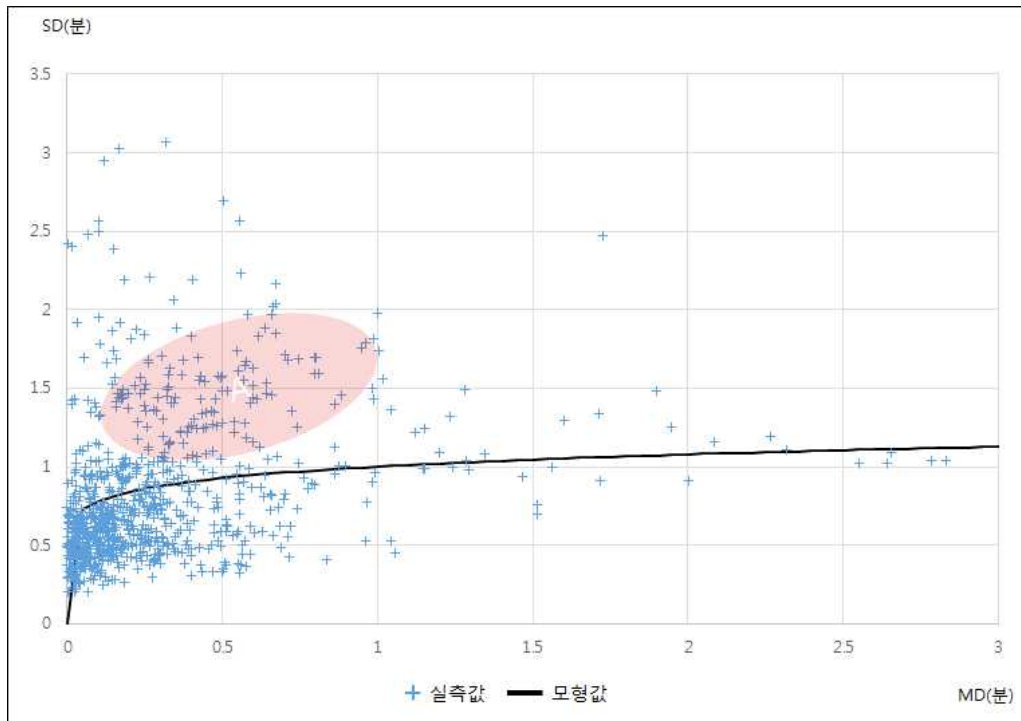
네가지 모형(1차선형 함수, 2차 함수, 파워 함수, 로그선형 함수)모두 <그림 5-10>에서 보여주는 A영역에 대한 설명력은 낮은 것으로 보인다. 이는 장거리 구간만 따로 데이터셋을 구성하여 모형을 구축하지 않았기 때문으로 판단된다. 따라서 장거리 구간만 따로 데이터 셋을 구성하여 각 모형에 대한 파라미터를 다시 추정하였다.



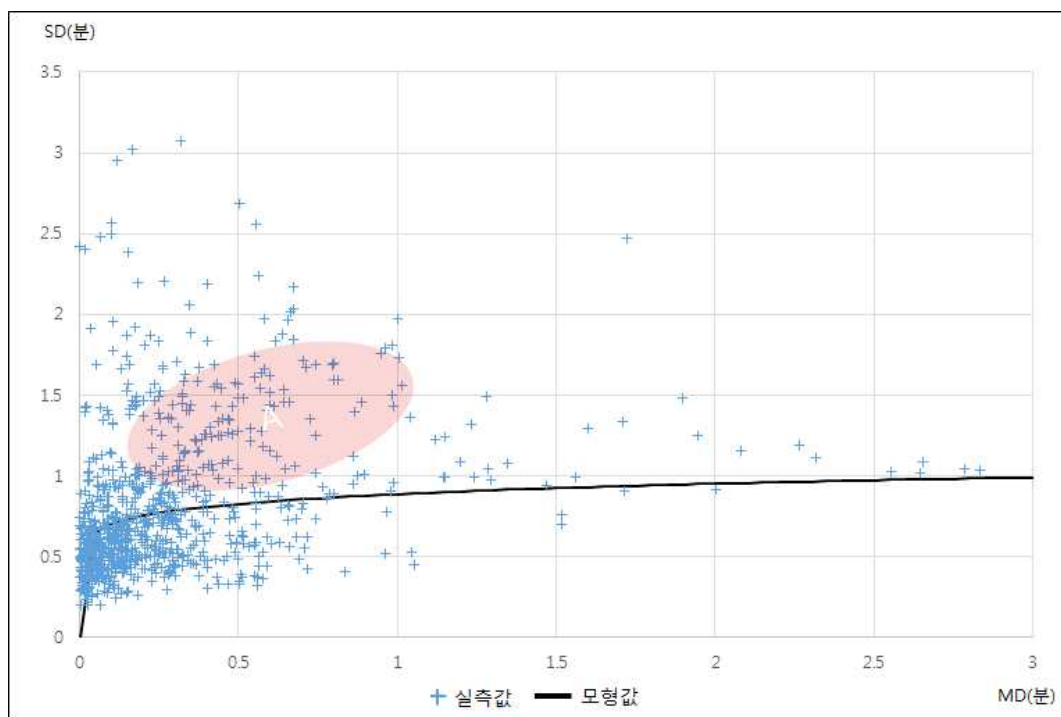
<그림 5-10> 실측값과 모형값 비교: 장거리-1차선형 함수



<그림 5-11> 실측값과 모형값 비교: 장거리-2차 함수



<그림 5-12> 실측값과 모형값 비교: 장거리-파워 함수



<그림 5-13> 실측값과 모형값 비교: 장거리-로그선형 함수

3) 장거리 링크-모형 재추정

링크거리가 긴 순서대로 데이터를 구축하여 각 모형에 대한 파라미터를 다시 추정하였다. 전체 데이터 중에서 링크길이가 긴 10% 데이터에 대해서 분석을 실시하였으며, 모형에 대한 기본식은 다음과 같다.

1차선형 함수: $\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma L$

2차 함수: $\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2$

파워 함수: $\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma \text{LOG}(MD+1) + \delta L$

로그선형 함수: $\text{Log}(\sigma) = \alpha + \beta \text{LOG}(MD) + \gamma \text{LOG}(L)$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

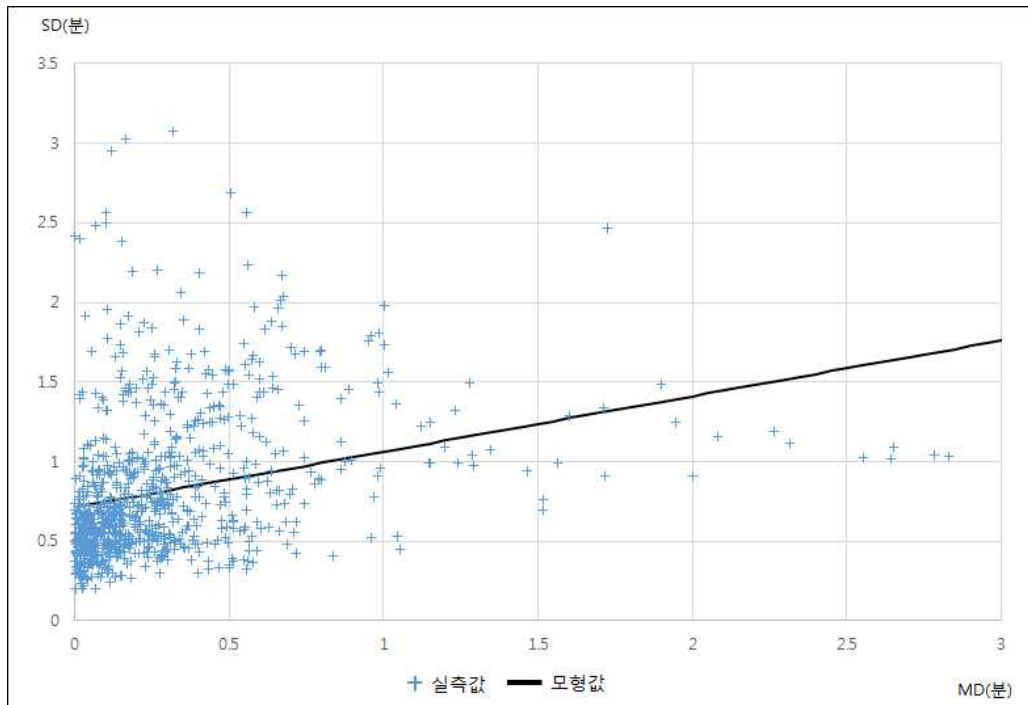
σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta$: 파라미터

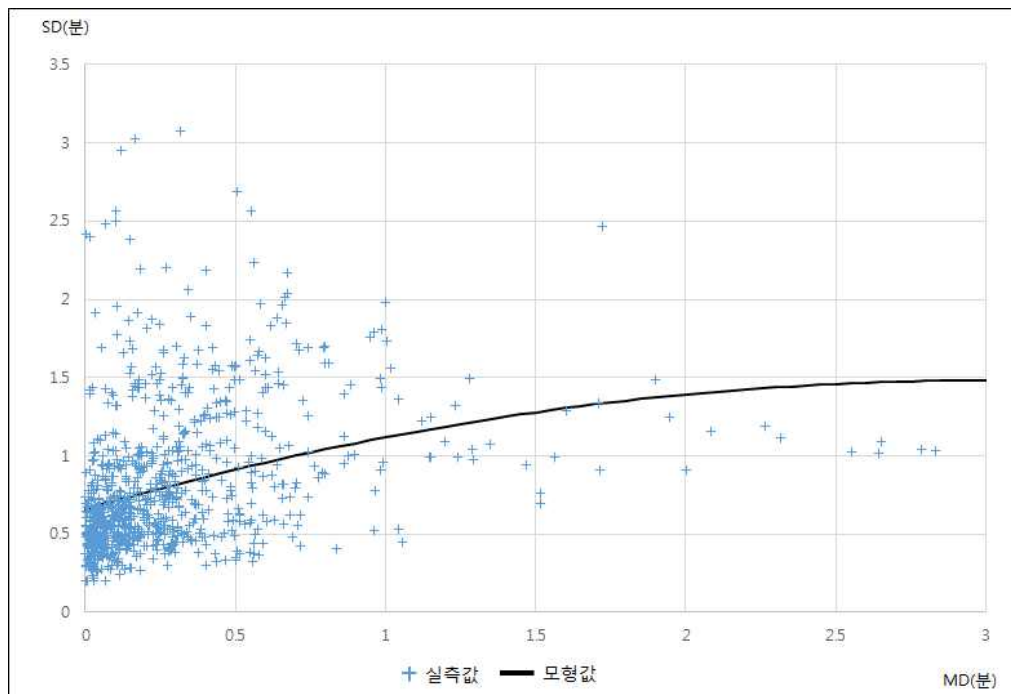
<표 5-14> 장거리 링크에 대한 파라미터 재추정

구분	계수추정		R-square
1차선형	α	-0.129*	0.653
	β	0.349*	
	γ	0.173*	
2차 함수	α	-0.092*	0.660
	β	0.549*	
	γ	-0.106*	
	δ	0.150*	
	η	0.001*	
파워 함수	α	0.214*	0.640
	β	0.127*	
	γ	0.983*	
로그선형	α	-0.687*	0.590
	β	0.116*	
	γ	0.963*	

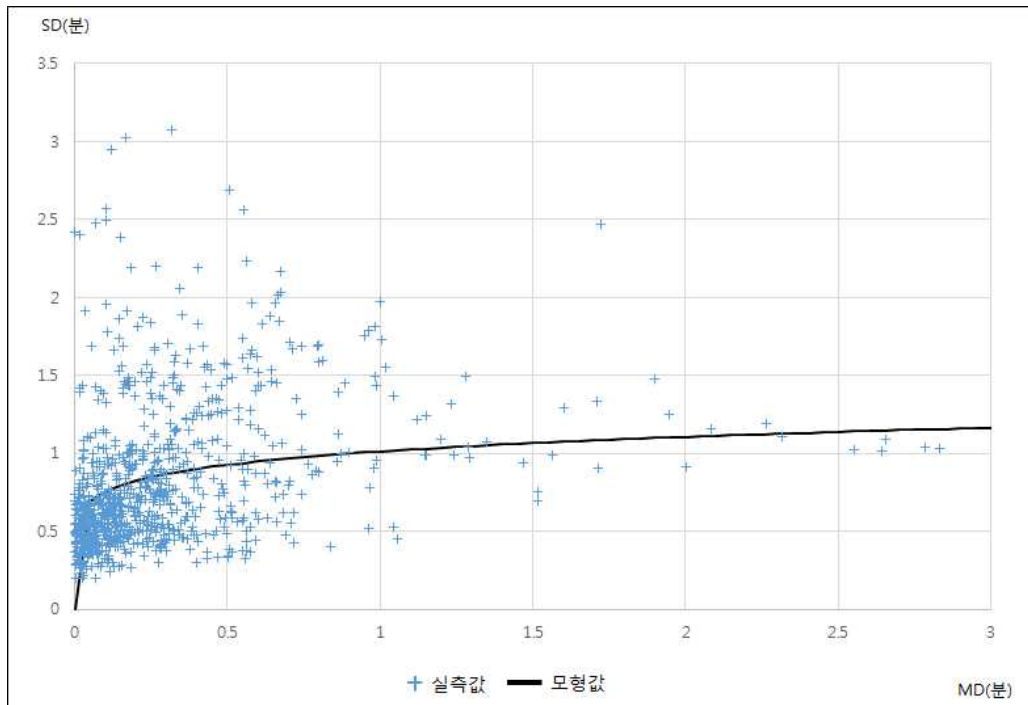
*: 계수추정치가 0.01수준에서 유의함



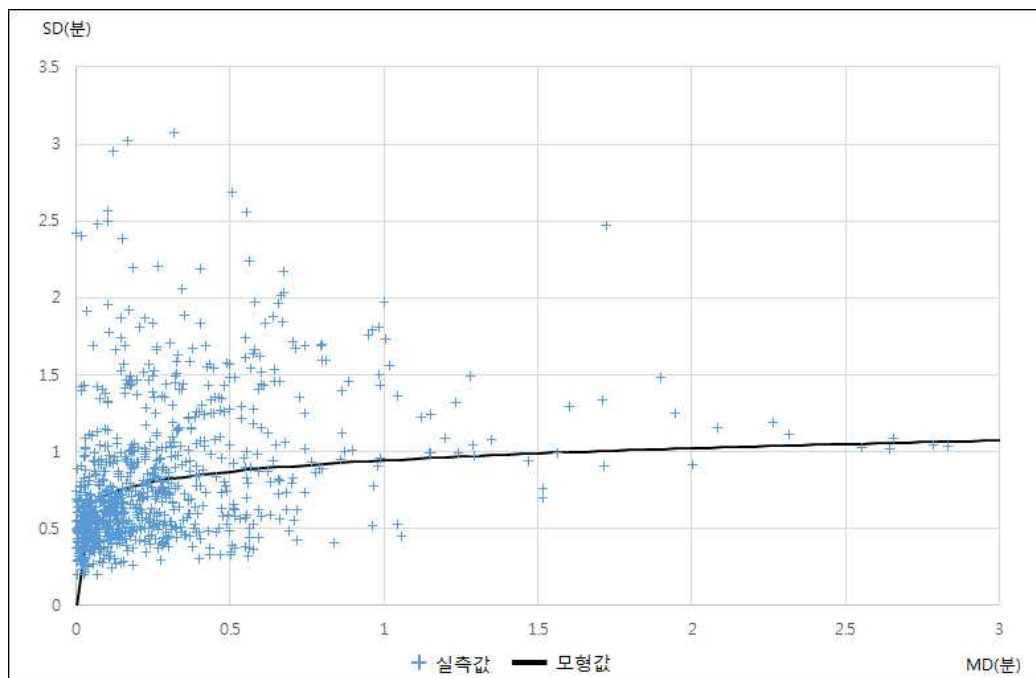
<그림 5-14> 실측값과 모형값 비교: 장거리-1차선형 함수(재추정)



<그림 5-15> 실측값과 모형값 비교: 장거리-2차 함수(재추정)



<그림 5-16> 실측값과 모형값 비교: 장거리-파워 함수(재추정)

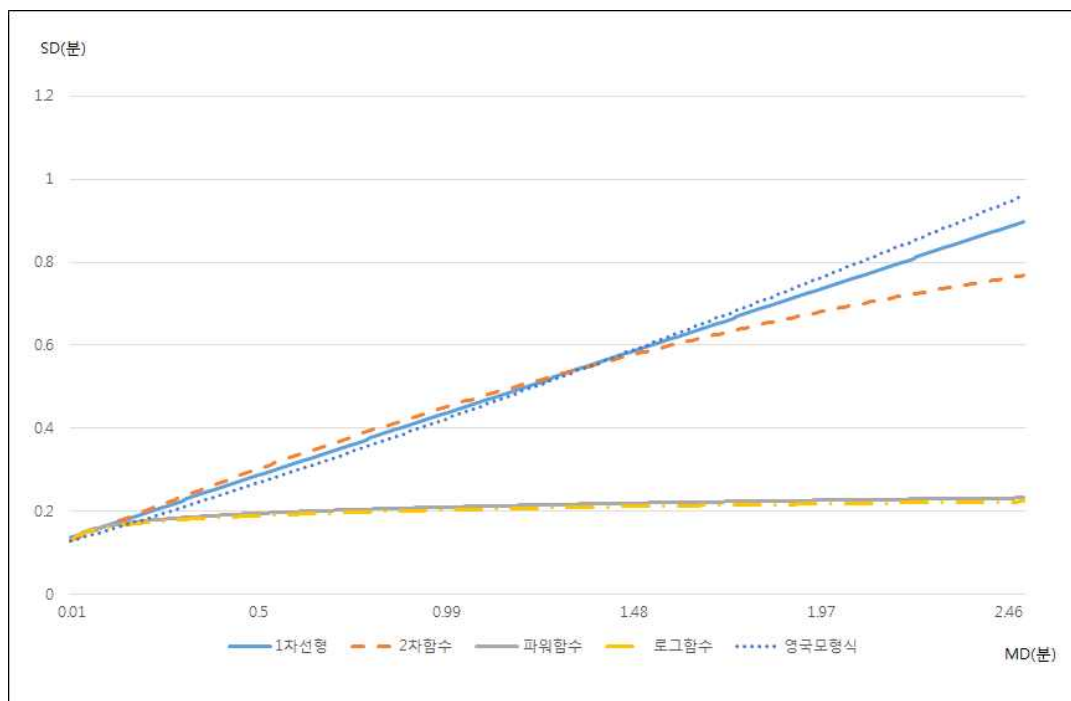


<그림 5-17> 실측값과 모형값 비교: 장거리-로그선형 함수(재추정)

4) 분석결과 종합

장거리 및 초장거리 링크에 대한 별도의 데이터셋을 구축하여 모형의 파라미터를 재추정하였다. 링크 길이가 길어지는 만큼 링크 부분을 설명하는 파라미터 값이 작아지는 것을 파악할 수 있다. 그리고 모형의 형태 중에서 장거리 링크 분석에 적합한 모형은 2차 함수로 판단된다. 우선 파라미터 추정을 위한 모형에서 결정계수가 다른 두 모형보다 높은 값을 보여주었다. 그리고 실측값과 모형값을 비교한 산포도를 살펴볼 때도 다른 두 모형보다도 전체적인 MD값에서 실측값과 유사한 형태를 보여주었다.

비록 장거리 링크구간은 전체 데이터셋에서 큰 비중을 차지하지는 않지만, 오차가 발생하면 큰 구간이므로(표준편차 값이 크므로) 전반적으로 모든 구간에 대한 높은 설명력이 보이는 2차함수 형태의 모형이 통행시간 신뢰성 지표 산정모형으로 적합한 것으로 판단된다.



<그림 5-18> Mean Delay에 따른 통행시간 표준편차 변화: 모형간 비교

제4절 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 검토

1. 중차량 비율에 따른 통행시간 신뢰성 지표 산정 모형 검토

기존의 연구에서는 중차량(특히 트럭)은 교통류에 영향을 미치고 차량의 속도에 영향을 주는 것으로 나타났다. 특히 Shamkar(1998)의 연구에서는 링크의 차종 구성비는 차량속도 편차와 상호 영향을 준다고 하였다. 따라서 본 연구에서도 통행시간 신뢰성 지표 산정 모형에 중차량 비율을 추가하여 모형을 구축하였다. 모형을 구축하기에 앞서 시간에 따른 중차량 비율과, 고속도로에 따른 중차량 비율을 살펴보았다.

시간에 따른 중차량 비율을 살펴보면 혼잡이 덜한 시간대인 심야시간대에 중차량 비율이 높은 것을 알 수 있다. 그리고 고속도로에 따른 중차량 비율을 살펴보면 도시부에 위치한 도로(경인, 외곽순환) 보다 지방부에 위치한 도로(중부내륙)가 중차량 비율이 높은 것을 알 수 있다.

<표 5-15> 시간에 따른 중차량 비율

시간대	중차량 비율(%)	시간대	중차량 비율(%)
0~1	28.95	12~13	28.02
1~2	29.25	13~14	28.01
2~3	29.51	14~15	27.96
3~4	29.49	15~16	27.93
4~5	29.11	16~17	27.91
5~6	28.74	17~18	27.93
6~7	28.47	18~19	27.99
7~8	28.27	19~20	28.08
8~9	28.16	20~21	28.15
9~10	28.07	21~22	28.23
10~11	28.00	22~23	28.37
11~12	28.00	23~0	28.60

<표 5-16> 고속도로에 따른 중차량 비율

도로명	중차량 비율(%)
경부	27.35
경인	21.18
서해안	28.46
영동	23.7
중부	28.37
중부내륙	32.3
호남	27.11
서울외곽순환	23.78

따라서 본 연구에서는 기존연구결과 및 <표 5-15>, <표 5-16>에 제시된 결과처럼 시간대 및 도로 별로 중차량 비율이 다른 것을 알 수 있다.

중차량 비율을 반영하여 통행시간 신뢰성 지표 산정모형을 구축하였다. 중차량 비율(HR; Heavy vehicle Ratio) 파라미터 추정결과 0.178로 중차량 비율이 높아지면 링크 통행시간 표준편차가 증가하는 것으로 알 수 있다. 예를 들면 중차량 비율이 10%(0.1)오르면 링크 통행시간 표준편차가 약 0.018 증가하는 것으로 파악할 수 있다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 + \zeta HR \quad (5-15)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

HR : 중차량 비율($HR < 1$)

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta$: 파라미터

<표 5-17> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 중차량 비율

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	-0.055	0.002	-22.333	0.000
β	0.403	0.008	48.665	0.000
γ	-0.059	0.006	-10.761	0.066
δ	0.135	0.001	148.221	0.000
η	0.002	0.000	25.178	0.000
ζ	0.178	0.008	21.615	0.000

R^2 : 0.892

2. 차로수에 따른 통행시간 신뢰성 지표 산정 모형 검토

본 연구에서는 차로수에 따라서 통행시간 신뢰성 지표(통행시간 표준편차)가 영향을 받는지 살펴보았다. 우선 차로수에 따른 MD(Mean Delay, 분), 링크통행시간 표준편차(분), 링크길이(km), 중차량 비율을 살펴보았다. 링크의 혼잡수준을 판단할 수 있는 MD(Mean Delay)를 차로수에 따라서 살펴보면 차로수가 많을수록 MD(Mean Delay)는 높은 값을 보인다. 이는 차로수가 많을수록 더 혼잡함을 의미한다. 반면에 링크 표준편차는 4차로 이상의 도로가 가장 낮는데, 이는 차량간의 통행시간 편차가 낮음을 의미한다. 중차량 비율은 차로수가 높을수록 낮아지며 이는 중차량(트럭)은 2차로 도로로 많이 통행함을 의미하며, 이는 도로 혼잡도와 링크가 위치한 지역에 따른 영향으로 파악된다.

<표 5-18> 차로수에 따른 기초통계 분석

구분		MD	표준편차	링크길이	중차량비율
2차로(편도)	평균	0.055	0.188	1.140	0.295
	표준편차	0.133	0.314	1.713	0.087
	최대값	2.745	3.865	17.596	0.475
	최소값	0.000	0.001	0.012	0.002
	중위값	0.015	0.074	0.478	0.303
3차로(편도)	평균	0.085	0.231	1.355	0.291
	표준편차	0.171	0.356	1.846	0.073
	최대값	3.037	3.117	13.956	0.480
	최소값	0.000	0.001	0.011	0.002
	중위값	0.026	0.096	0.675	0.296
4차로(편도) 이상	평균	0.112	0.154	0.994	0.240
	표준편차	0.194	0.192	1.135	0.051
	최대값	2.942	1.573	10.088	0.415
	최소값	0.000	0.001	0.007	0.027
	중위값	0.042	0.086	0.583	0.244

4차로 이상의 도로가 중차량(트럭) 비율이 낮은 이유는 주로 도시부에 위치하고, 혼잡이 심하기 때문으로 파악된다. 중차량은 주로 업무통행이 대부분이며, 이는 통행시간에 중요한 영향을 받으므로 혼잡이 덜한 지방부 2차로 고속도로를 주로 이용한다고 볼 수 있다. 그리고 본 연구에서는 도시부와 지방부를 구분하지 않았으나, 차로수에 따른 분포지역을 살펴보면 2차로 도로는 지방부에, 4차로 도로는 주로 도시부에 위치한 것으로 알 수 있다. 즉 2차로 도로는 지방부, 4차로 도로는 도시부의 특성을 가지고 있다고 볼 수 있다.

<표 5-19> 차로수에 따른 분포지역

구분	지역구분	링크수(개)	비율(%)
전체	도시부	19,007	30.06%
	지방부	44,223	69.94%
	전체	63,230	
2차로(편도)	도시부	3,743	9.98%
	지방부	33,759	90.02%
	전체	37,502	
3차로(편도)	도시부	4,008	35.91%
	지방부	7,152	64.09%
	전체	11,160	
4차로(편도) 이상	도시부	11,256	77.27%
	지방부	3,312	22.73%
	전체	14,568	

기존의 연구에서는 차로수에 따라서 통행속도 및 용량이 다르다고 제시하였지만, 차로수에 따른 통행시간 신뢰성 지표(통행시간 표준편차)가 다르다고 제시한 연구는 없었다. 따라서 본 연구에서는 차로수에 따라서 통행시간 신뢰성 추정 모형을 달리 구축해야 하는 지 Chow test를 통하여 살펴보았다. 그리고 차로수 집단간 통행시간 표준편차가 유의미한 차이가 나는지 정규성 검정 및 비모수 검정을 실시하였다.

Chow test는 Chow(1960)에 의해서 제시된 방법으로 회귀분석을 했을 때 하위 그룹별로 회귀분석 추정모형을 달리 구축해야하는지를 검정하는 방법이다. 예를 들어 시간대별(2차대전 이전, 이후)로 소비자들의 구매행태가 같다고 할 수 있는지, 철강 산업과 화학 산업이 동일한 소비자 행태를 보여주는지 살펴볼 수 있다(Chow(1960)).

Chow test는 $y = \alpha + bx + \epsilon$ 와 같은 모형이 있다고 가정할 경우, 이를 하위 그룹별로 모형을 추정하면 $y = \alpha_1 + b_1x + \epsilon$, $y = \alpha_2 + b_2x + \epsilon$ 로 구축할 수 있다. Chow test의 귀무가설은 $a_1 = a_2, b_1 = b_2$ 가 같다는 것이다. Chow test 결과값은 F-value형태로 도출되며 F-value의 유의확률을 통해서 귀무가설의 기각, 채택여부를 판단할 수 있다. Chow test의 기본식은 다음과 같다.

$$\frac{(SSR_t - SSR_1 - SSR_2)/k}{(SSR_1 + SSR_2)/(N_1 + N_2 - 2k)} \quad (5-16)$$

여기서,

SSR : 잔차제곱합(t: 전체, 1, 2: 하위그룹)

k : 파라미터 갯수

N : 표본수

차로수에 따라서 회귀모형을 달리 추정해야 하는지 Chow test를 실시한 결과는 다음 <표 5-20>과 같다. Chow test결과 통행시간 신뢰성 추정 모형은 차로수(2차로, 3차로, 4차로 이상)에 따라서 달리 추정하는 것이 적정한 것으로 나타났다.

<표 5-20> Chow test 결과(Group 설정: 차로수)

구분	하위그룹	
	2차로-3차로 이상	3차로-4차로 이상
F-value	144.877	281.984
유의확률	0.00	0.00
귀무가설 판단	기각	기각

차로수에 따라서 통행시간 표준편차 분포가 다른지 t-검정을 하기 위해서 통행시간 표준편차의 분포가 정규분포를 따르는지 Kolmogorov - Smirnov 검정을 실시하였다.

정규성 검정 결과 통행시간 표준편차 분포는 정규분포가 아니므로 t-검정을 통하여 차로수에 따라서 통행시간 표준편차가 다르다고 판단할 수 없었다. 따라서 비모수검정을 통해서 차로수에 따른 통행시간 표준편차 분포가 다름을 확인할 수 있다.

<표 5-21> 2차로와 3차로 이상 도로 정규성 검정(Kolmogorov-Smirnov)

변수	집단	통계량	자유도	유의확률*
통행시간 표준편차	2차로	0.275	16,725	0.000
	3차로 이상	0.25	16,577	0.000

*: 유의확률이 0.05미만이므로 정규분포를 갖는다고 말할 수 없음

비모수 검정결과 차로수(2차로, 3차로, 4차로 이상)에 따라서 통행시간 표준편차 분포는 같다고 볼 수 없으므로, 차로수를 반영하여 통행시간 표준편차를 살펴보는 것이 적절한 것으로 판단된다.

<표 5-22> 2차로와 3차로, 4차로 이상 도로에 대한 비모수검정 결과

검정	귀무가설	유의확률*	판단
Wald-Wolfwitz 검정	표준편차 분포는 차로수 범주에서 동일함	0.004	귀무가설 기각
중앙값 검정	표준편차 분포는 차로수 범주에서 동일함	0	귀무가설 기각
Mann-Whitney 검정	표준편차 분포는 차로수 범주에서 동일함	0	귀무가설 기각
Kruskal-Wallis 검정	표준편차 분포는 차로수 범주에서 동일함	0	귀무가설 기각

*: 유의확률이 0.05미만이므로 표준편차 분포는 차로수(2차로, 3차로 이상)에 따라서 동일하다고 볼 수 없음

1) 차로수는 더미변수로 반영

차로수를 반영하는 방법으로는 우선 차로수변수를 더미변수로 처리하여 모형을 구축하였다. 단방향 2차로 도로는 0, 3차로 이상은 1로 처리하여 파라미터를 추정한 결과 차로수 계수는 -0.012로 추정되었다. 이는 차로수가 3차로 이상의 도로가 통행시간 표준편차가 2차로 보다는 낮기 때문에 이와 같은 결과가 도출된 것으로 판단된다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 + \zeta HR + \kappa NL \quad (5-17)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

HR : 중차량 비율

NL : 차로수(2차로=0, 3차로 이상=1)

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta, \kappa$: 파라미터

<표 5-23> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 차로수 반영

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	-0.045	0.003	-16.877	0.000
β	0.415	0.008	49.627	0.000
γ	-0.065	0.006	-11.728	0.000
δ	0.134	0.001	148.054	0.000
η	0.002	0.000	25.130	0.000
ζ	0.163	0.008	19.538	0.000
κ	-0.012	0.001	-9.365	0.000
R^2 : 0.892				

2) 차로수에 따른 개별모형 구축

차로수를 반영하여 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 구축을 위해서 차로수에 따라서 파라미터를 개별적으로 추정하였다. 단방향 2차로 고속도로와 3차로 이상 고속도로의 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 파라미터 추정결과는 비슷하게 분석되었다. 다만 중차량 모수가 차이가 나고 이는 3차로 이상의 도로와 2차로 도로는 중차량 비율이 많이 다르기 때문으로 파악된다.

① 2차로와 3차로 이상으로 구분

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 + \zeta HR \quad (5-18)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

HR : 중차량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta$: 파라미터

<표 5-24> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 차로수 구분1

구분	2차로		3차로 이상	
	추정값	유의확률	추정값	유의확률
α	-0.043	0.000	-0.064	0.000
β	0.439	0.000	0.434	0.000
γ	-0.069	0.000	-0.058	0.000
δ	0.145	0.000	0.111	0.000
η	0.001	0.000	0.005	0.000
ζ	0.131	0.000	0.239	0.000
R^2	0.884		0.909	

① 2차로와 3차로, 4차로 구분

차로수를 반영하여 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 구축을 위해서 차로수를 2차로, 3차로, 4차로 이상으로 구분하여 파라미터를 개별적으로 추정하였다. 단방향 2차로, 3차로, 4차로 고속도로의 통행시간 신뢰성 지표 산정모형 파라미터 추정결과는 차로수에 따라 차이가 보임에 따라서 통계적으로 유의미한 차이를 보이는 지 살펴보았다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 + \zeta HR \quad (5-19)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

HR : 증차량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta$: 파라미터

<표 5-25> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 차로수 구분2

구분	2차로		3차로		4차로 이상	
	추정값	유의확률	추정값	유의확률	추정값	유의확률
α	-0.043	0.000	-0.083	0.000	-0.043	0.000
β	0.439	0.000	0.480	0.000	0.421	0.000
γ	-0.069	0.000	-0.100	0.000	-0.021	0.000
δ	0.145	0.000	0.135	0.000	0.109	0.000
η	0.001	0.000	0.004	0.000	0.001	0.000
ζ	0.131	0.000	0.256	0.000	0.167	0.000
R^2	0.884		0.923		0.903	

차로수(2차로, 3차로, 4차이상)에 따라서 도로 통행시간 신뢰성 지표 추정 모형을 구축하고 파라미터를 추정한 결과는 차로마다 약간 차이가 있었다. 그 차이 정도가 통계적으로 유의미한지 살펴보기 위해서 Chow test를 실시하고, 개별 모수에 대한 95%신뢰구간 값을 살펴보았다. Chow test 분석결과 차로수에 따라서 모형을 달리 추정하는 것이 적절하다고 도출되었으며, 기타 통계분석에서도 마찬가지로의 결과로 검토되었다. 따라서 통행시간 신뢰성 지표 산정모형은 차로수에 구분하되, 2차로, 3차로, 4차로 이상으로 모형을 구축하고 모수를 추정하는 것이 적절한 것으로 판단된다.

중차량비율에 따른 파라미터값을 살펴보면 3차로 구간이 매우 높게 추정되었고, 2차로 도로와 4차로 이상도로는 비슷하게 도출되었다. 이는 3차로 구간이 통행시간 표준편차가 다른 구간보다 높기 때문에 전반적인 모수 값이 높게 추정되었기 때문으로 판단된다.

<표 5-26> 통행시간 신뢰성 지표 추정 모형 계수 분석결과 및 신뢰수준

		모수 추정값					
		α	β	γ	δ	η	ζ
2차로	모수추정값	-0.043	0.439	-0.069	0.145	0.001	0.131
	상한*	-0.036	0.471	-0.049	0.148	0.001	0.153
	하한	-0.050	0.407	-0.089	0.142	0.001	0.108
3차로	모수추정값	-0.083	0.48	-0.1	0.135	0.004	0.256
	상한	-0.071	0.513	-0.079	0.139	0.004	0.295
	하한	-0.095	0.446	-0.121	0.131	0.003	0.218
4차로 이상	모수추정값	-0.043	0.421	-0.021	0.109	0.001	0.167
	상한	-0.036	0.438	-0.009	0.113	0.002	0.196
	하한	-0.050	0.405	-0.033	0.106	0.001	0.138

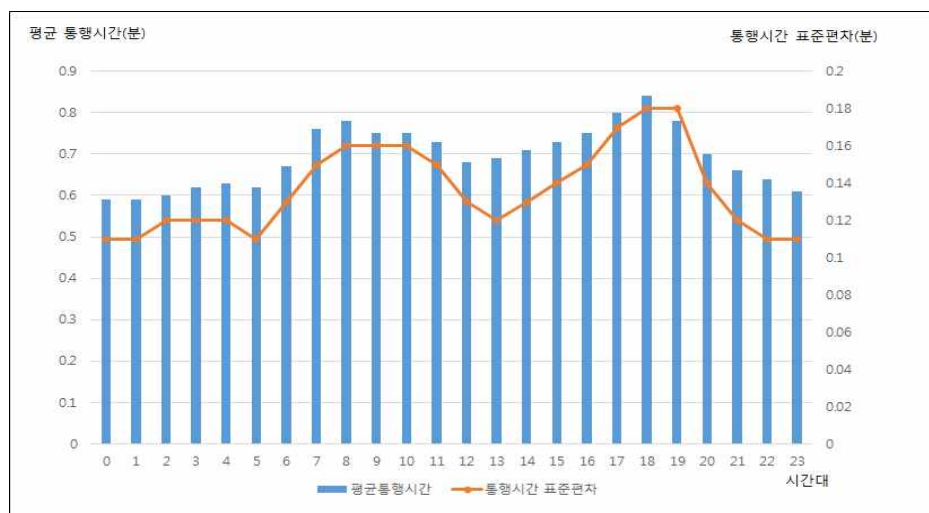
*: 모수(파라미터)추정치에 대한 95% 신뢰구간

3. 통행시간 신뢰성 지표 검토

1) 통행시간 대비 통행시간 표준편차 비율(영국모형식)

영국 DfT(Depart for London)의 TAG(Transport Analysis Guidance)에서는 통행시간 신뢰성 산정 지표로 통행시간 대비 통행시간 표준편차 비율을 이용하고 있다. 통행시간 신뢰성 지표인 CV는 평균 통행시간과 통행시간 표준편차의 비율이며, CV는 혼잡지표인 ci와 통행거리를 통하여 산정된다. 혼잡지표인 ci는 평균속도 통행시간과 기준속도 통행시간의 비율이다. ci값은 혼잡지표라고 제시하고 있으며, 이는 혼잡도가 증가하면 평균속도는 감소하고 결국 ci값은 증가하는 패턴을 보여주기 때문이다. 영국 TAG의 모형식에서는 혼잡도가 증가하여 ci값이 증가하면, 통행시간 표준편차도 증가하는 관계를 보여주며, 혼잡이 증가하면 통행시간 신뢰성도 상승하는 기본적인 상식과 부합한다고 볼 수 있다.

그러면 링크 평균통행시간과 통행시간 표준편차는 관련성이 깊은지 간략히 살펴보았다. 하루 24시간에 대해서 각 시간대별 평균 통행시간과 시간대별 통행시간 표준편차를 집계하였으며, 통행시간이 긴 시간대에서는 통행시간 표준편차도 높은 값을 보여주었다(서울외곽순환고속도로를 대상으로 살펴봄).



<그림 5-19> 평균통행시간과 통행시간 표준편차

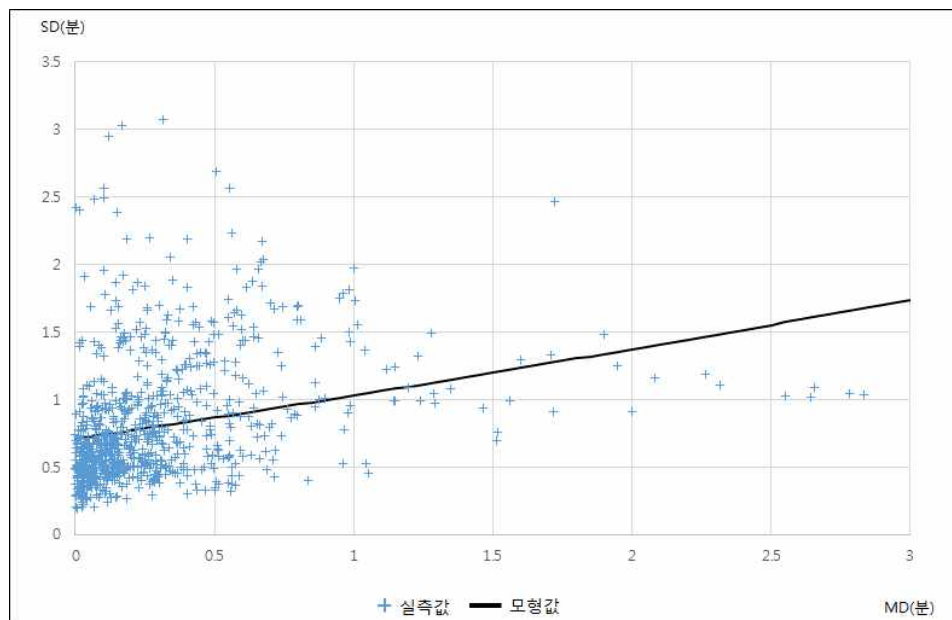
①장거리 링크 분석

링크길이가 3km~14km인 구간에 대해서 별도로 데이터셋을 구축하여 통행시간 신뢰성 지표 추정모형에서 파라미터를 재 추정 하였다. 이는 본 연구에서 제시한 모형 형태(2차함수)와 직접 비교하기 위함이다. 모형의 결정계수로 비교하면, 장거리 링크에 대해서는 2차함수 모형이 0.660이고, 영국모형인은 0.652이므로 2차함수 모형이 더 적절한 것으로 판단된다.

$$\sigma = \alpha CI^{\beta} L^{\gamma} TT \quad (5-20)$$

<표 5-27> 영국모형식 계수 추정결과 및 결정계수

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	0.193	0.010	21.444	0.000
β	0.281	0.075	3.754	0.000
γ	0.136	0.025	5.506	0.000
R^2 : 0.652				



<그림 5-20> 실측값과 모형값 비교: 장거리-영국모형식(재추정)

②중차량 비율 및 차로수 구분

중차량 비율과 차로수를 반영하여 영국모형식의 파라미터 값을 재추정하였다. 차로수에 따른 파라미터 값이 가장 크게 차이나는 변수는 링크의 혼잡도를 반영하는 CI(Congestion Index)이다. 이는 2차로 도로와 3차로 이상 도로의 혼잡도가 많이 다르기 때문이며, 3차로 이상의 도로의 혼잡도가 더 극심하므로 이를 반영하는 파라미터 값이 더 크게 도출되었을 것으로 판단된다.

$$\sigma = \alpha CI^{\beta} L^{\gamma} HR^{\zeta} TT \quad (5-21)$$

여기서,

CI : 평균속도 통행시간/기준속도 통행시간

L : 링크길이

HR : 중차량 비율

TT : 평균통행시간

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \zeta$: 파라미터

<표 5-28> 영국모형식 계수 추정결과 및 결정계수

구분	2차로		3차로 이상	
	모수 추정값	유의확률	모수 추정값	유의확률
α	0.278	0.000	0.240	0.000
β	0.255	0.000	0.377	0.000
γ	0.027	0.000	0.049	0.000
ζ	0.120	0.000	0.166	0.000
R^2	0.883		0.908	

차로수에 따른 R^2 는 2차로는 0.883, 3차로 이상은 0.908로 도출됐으며, 3차로 이상의 도로가 더 높은 결정계수 값을 보이고 있다. 이는 2차함수 형태로 추정했을 때와 비슷한 경향을 보여 준다.

2) 단위거리당 통행시간 표준편차

본 연구에서는 통행시간 표준편차를 링크단위로 집계하여 통행시간 신뢰성 지표 추정 모형의 종속변수로 하였다. 링크단위로 집계하였다는 의미는 고속도로 네트워크에서 분기점(IC) 간의 통행단위로 볼 수 있으며, 분기점(IC) 간의 길이는 링크마다 다르므로, 링크길이를 독립변수로 하여 통행시간 표준편차 산정모형을 구축하였다. 본 절에서는 통행시간 표준편차를 링크길이를 나누어 1km단위로 표준화한 통행시간 표준편차를 통행시간 신뢰성 지표로 하여 모형을 추정하였다.

단위거리당 통행시간 표준편차와 독립변수들과의 상관관계를 검토한 결과 상관계수는 높지 않은 것으로 나타났다. 이는 링크 길이로 통행시간 표준편차를 나눔으로써 장거리 링크 또는 단거리 링크가 가지는 특성을 상실하기 때문으로 보인다. 그리고 독립변수로 유의미한 변수인 링크 길이를 모형추정식에 이용하지 못하므로 모형 적합도도 높지 않은 것으로 판단된다.

<표 5-29> 단위거리당 통행시간 표준편차와 독립변수 상관계수

	SD/L	MD	CI	V/C	TT	HR
SD/L	1					
MD	-0.104	1				
CI	-0.334	0.458	1			
V/C	-0.297	0.281	0.392	1		
TT	0.073	0.610	-0.006	0.070	1	
HR	0.365	-0.099	-0.257	-0.207	0.033	1

* 모든 상관계수가 0.01 수준에서 유의함

통행시간 신뢰성 지표 산정모형은 기본모형으로 결정한 이차함수 외에 파워함수, 로그함수 형태도 구축하였다. 다만 이차함수 등 통행시간 신뢰성 추정 모형 구축결과는 <부록 2>에 제시하였다. 결론적으로 단위거리당 통행시간 표준편차 모형은 현재의 분석자료로는 통행시간 신뢰성 지표 산정 모형으로 적합도가 그리 높지 않은 것으로 분석되었다.

3) 수정표준편차

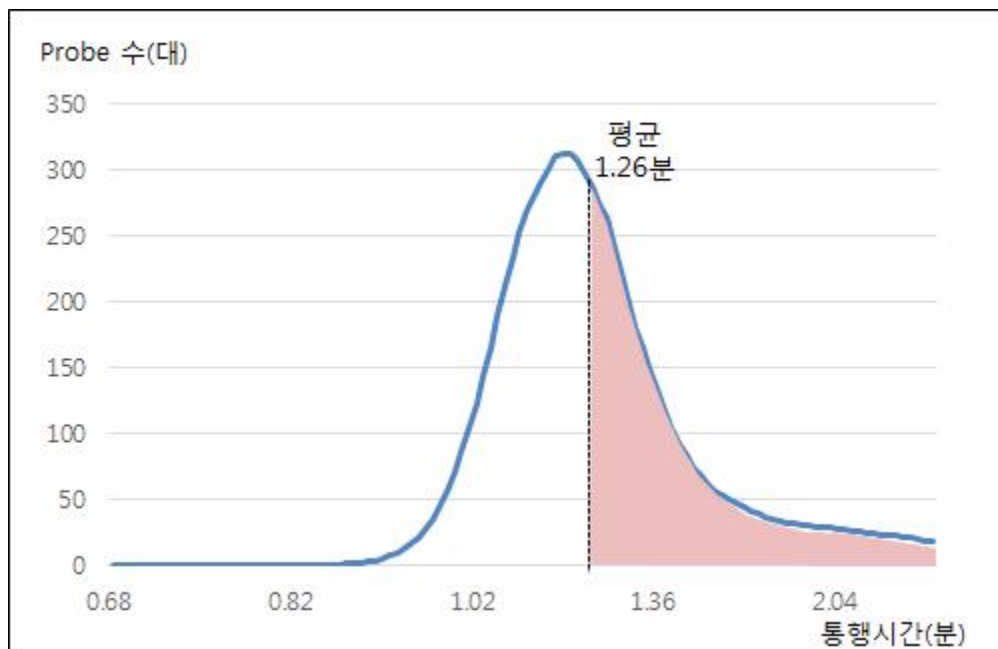
본 연구에서는 통행시간 신뢰성 지표로 통행시간 표준편차를 제시하였고 이는 평균통행시간 보다 일찍 도착한 통행도 고려하여 통행시간 신뢰성을 계산하는 것이다. 평균통행시간 보다 늦게 도착한 통행들로만 통행시간 신뢰성을 산정할 경우 새로운 지표를 제시하여야 한다. 본 연구에서는 아래 <그림 5-21>에서 제시하는 평균통행시간 보다 늦게 도착한 통행만을 고려하는 수정표준편차를 이용하여 분석을 실시하였다.

$$\text{수정표준편차} = \frac{\sum_{i=1}^N (TT_a - TT_{mean})}{N} \quad (5-22)$$

여기서,

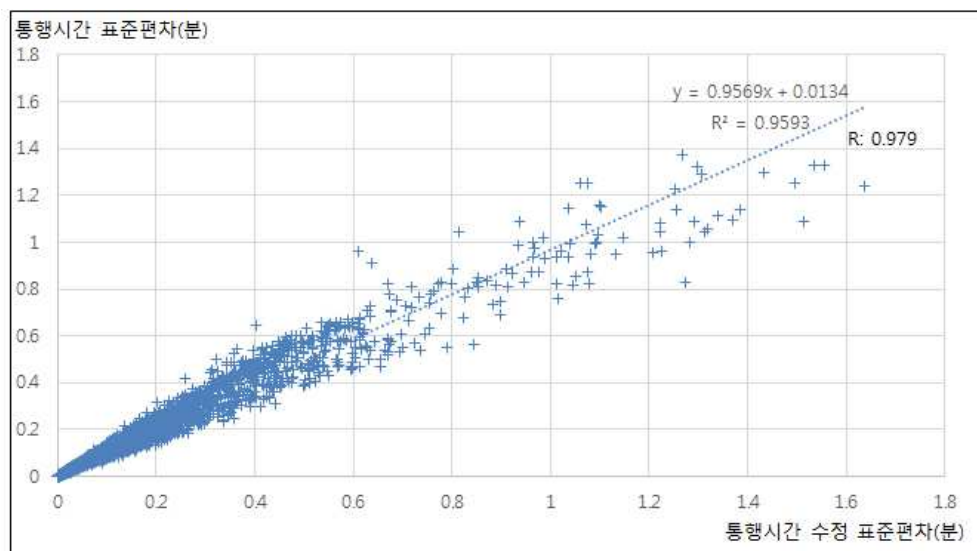
TT_a : 링크 통행시간 중 TT_{mean} 을 초과한 통행시간

TT_{mean} : 링크 평균 통행시간



<그림 5-21> 수정표준편차 개념

통행시간 표준편차와 수정 표준편차의 관계를 살펴보면 양의 선형관계로 볼 수 있으며, 상관계수는 0.979가 된다. 즉, 통행시간 표준편차가 높은 곳은 수정 표준편차도 높으며, 관계식의 기울기도 0.96으로 1에 근접한다. 즉 평균통행시간 보다 늦은 통행들로만 분석을 하여 통행시간 신뢰성 지표를 개발하여도, 일반적인 통행시간 표준편차 모형과 크게 다르지 않을 것으로 판단한다.



<그림 5-22> 통행시간 표준편차와 통행시간 수정 표준편차의 관계

<표 5-30> 통행시간 신뢰성 지표 모형 파라미터 추정결과: 수정표준편차

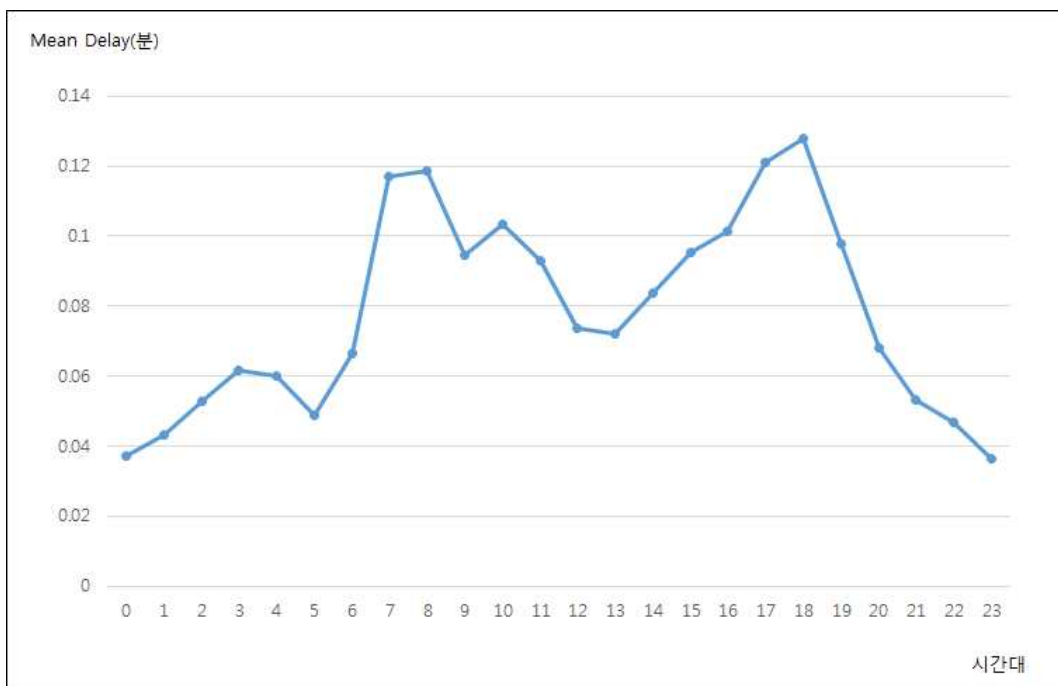
구분	파라미터		R^2
1차선형	α	0.001	0.797
	β	0.438**	
	γ	0.087**	
2차함수	α	-0.007**	0.806
	β	0.583**	
	γ	-0.113**	
	δ	0.085**	
	η	-0.001	
Power 함수	α	0.356**	0.802
	β	0.394**	
	γ	0.631**	

4. 공간 이전성 및 시간 이전성 검토

본 연구에서 추정한 통행시간 신뢰성 추정 모형에 대해서 시간 이전성 및 공간 이전성 검토를 실시한다. 시간이전성은 2차 함수 형태로 첨두, 비첨두, 심야시간대별로 모형식을 추정하여 각 시간대별 특성이 모형에 잘 반영되는지 살펴본다. 공간이전성은 2차 함수 형태로 각 도로별로 모형식을 추정하여 개별 도로마다 특성이 2차 함수 모형에 잘 반영되는지 검토한다.

가. 시간 이전성

시간대를 첨두, 비첨두, 심야로 구분하였으며, 시간대별 평균지체(Mean Delay)를 이용하였다. 시간대별 평균지체(Mean Delay)를 살펴보면 첨두는 4시간(7~9시, 17시~19시), 비첨두는 11시간, 심야는 9시간(21시~6시)으로 나타났다.



<그림 5-23> 시간대별(0시~24시, 1시간 단위) 평균지체(Mean Delay)

1) 첨두

① 통행관련 기초자료 분석

첨두시간대는 통행시간 표준편차는 0.197분이며, 통행시간 표준편차의 표준편차는 0.302로 편차가 매우 심한 것을 알 수 있다. 그리고 통행시간 표준편차는 평균값과 중앙값의 매우 큰 차이를 보이며, 중앙값이 평균값보다 적으며, 우측으로 긴 꼬리 분포를 가지는 것을 알 수 있다. 평균지체(Mean Delay)와 혼잡지표(Congestion Index)또한 통행시간 표준편차와 마찬가지로 평균값보다 중앙값이 적고, 표준편차가 큰 것으로 나타났다. 중차량 비율은 26.5%로 심야시간의 중차량 비율인 29.3%보다 적은 것을 알 수 있다. 이는 중차량의 대부분을 차지하는 화물차 통행이 심야에 많기 때문인 것으로 판단된다.

<표 5-31> 통행관련 기초자료 분석결과: 첨두

	통행시간 표준편차(분)	MD (분)	CI	V/C	중차량 비율(%)	속도 (km/h)
평균	0.197	0.122	1.209	0.477	26.5	84.369
표준 편차	0.302	0.249	0.273	0.219	6.2	14.019
min	0.001	0.000	1.000	0.005	3.2	40.281
max	3.453	3.125	2.440	1.726	48.0	98.286
median	0.090	0.033	1.093	0.480	25.7	89.916
1사분위	0.038	0.009	1.036	0.308	22.5	78.031
3사분위	0.218	0.123	1.260	0.620	30.4	94.881

② 통행시간 신뢰성 추정모형 구축

첨두시간대에 대해서 아래와 같은 2차함수 형태의 통행시간 신뢰성 추정 모형을 구축한 결과는 <표 5-32>와 같다. 모형의 결정계수(R^2)는 0.879로 비교적 높게 도출되었으며, 개별 파라미터에 대해서도 통계적으로 유의미하게 나왔다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 + \zeta TR \quad (5-23)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

HR : 중차량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta$: 파라미터

<표 5-32> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 첨두

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	-0.077	0.007	-10.945	0.000
β	0.349	0.014	25.419	0.000
γ	-0.033	0.007	-4.551	0.000
δ	0.137	0.002	65.763	0.000
η	0.002	0.000	10.359	0.000
ζ	0.265	0.025	10.500	0.000
R^2 : 0.879				

2) 비침두

① 통행관련 기초자료 분석

비침두시간대는 통행시간 표준편차는 0.191분이며, 통행시간 표준편차의 표준편차는 0.303로 편차가 매우 심한 것을 알 수 있다. 그리고 통행시간표준편차는 평균값과 중앙값의 매우 큰 차이를 보이며, 중앙값이 평균값보다 적으며, 우측으로 긴 꼬리 분포(Lognormal)를 가지는 것을 알 수 있다. 장수은(2008)의 연구에서도 통행시간 분포에 대해서 검토하였으며, 대체적으로 로그정규분포나 감마분포를 따르는 것으로 제시하였다. 본 연구에서도 통행시간 분포와 마찬가지로 통행시간 표준편차가 로그정규분포나 감마분포처럼 오른쪽으로 꼬리가 긴 형태임을 확인 할 수 있다.

<표 5-33> 통행관련 기초자료 분석결과: 비침두

	통행시간 표준편차(분)	MD (분)	CI	V/C	중차량 비율(%)	속도 (km/h)
평균	0.191	0.087	1.150	0.428	26.9	87.437
표준 편차	0.303	0.172	0.209	0.201	6.3	11.272
min	0.001	0.000	1.000	0.003	2.6	39.120
max	3.865	2.833	2.513	1.671	45.2	98.298
median	0.084	0.027	1.078	0.426	26.1	91.217
1사분위	0.036	0.007	1.032	0.269	22.9	84.182
3사분위	0.213	0.089	1.168	0.572	30.6	95.262

② 통행시간 신뢰성 추정모형 구축

비첨두 시간대에 대해서 아래와 같은 2차함수 형태의 통행시간 신뢰성 추정 모형을 구축한 결과는 <표 5-34>와 같다. 모형의 결정계수(R^2)는 0.885로 비교적 높게 도출되었으며, 개별 파라미터에 대해서도 통계적으로 유의미하게 나왔다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 + \zeta TR \quad (5-24)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

HR : 중차량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta$: 파라미터

<표 5-34> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 비첨두

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	-0.086	0.004	-22.261	0.000
β	0.417	0.010	40.187	0.000
γ	-0.066	0.007	-9.642	0.000
δ	0.127	0.001	107.723	0.000
η	0.003	0.000	27.000	0.000
ζ	0.306	0.014	22.367	0.000
R^2 : 0.885				

3) 심야

① 통행관련 기초자료 분석

심야시간대는 통행시간 표준편차 평균은 0.174분이며, 통행시간 표준편차의 표준편차는 0.273으로 편차가 매우 심한 것을 알 수 있다. 다만 평균값 및 표준편차 값은 첨두나 비첨두 시간대보다는 적은 것을 알 수 있다. 이는 심야시간대가 다른 시간대보다 차량통행 속도가 비교적 균일하기 때문인 것으로 보인다. 그리고 통행시간표준편차는 평균값과 중앙값의 매우 큰 차이를 보이며, 중앙값이 평균값보다 적으며, 우측으로 긴 꼬리 분포를 가지는 것을 알 수 있다. 중차량 비율은 29.3%로 첨두시간대의 중차량 비율인 26.5%, 비첨두시간대인 26.9%보다 높은 것을 알 수 있다. 이는 중차량의 대부분을 차지하는 화물차 통행이 심야에 많기 때문인 것으로 판단된다.

<표 5-35> 통행관련 기초자료 분석결과: 심야

	통행시간 표준편차(분)	MD (분)	CI	V/C	중차량 비율(%)	속도 (km/h)
평균	0.174	0.050	1.088	0.120	29.3	91.036
표준 편차	0.273	0.096	0.114	0.115	9.8	6.713
min	0.000	0.000	1.000	0.001	0.2	37.000
max	3.079	1.991	2.657	0.954	47.5	98.300
median	0.077	0.018	1.064	0.079	31.5	92.426
1사분위	0.033	0.006	1.028	0.047	22.9	88.401
3사분위	0.194	0.050	1.112	0.148	36.3	95.629

② 통행시간 신뢰성 추정모형 구축

심야 시간대에 대해서 아래와 같은 2차함수 형태의 통행시간 신뢰성 추정 모형을 구축한 결과는 <표 5-36>과 같다. 모형의 결정계수(R^2)는 0.912로 비교적 높게 도출되었으며, 개별 파라미터에 대해서도 통계적으로 유의미하게 나왔다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 + \zeta TR \quad (5-25)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

HR : 중차량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta$: 파라미터

<표 5-36> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 심야

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	-0.034	0.002	-14.733	0.000
β	0.535	0.016	33.223	0.000
γ	-0.119	0.019	-6.290	0.000
δ	0.137	0.001	122.470	0.000
η	0.001	0.000	10.130	0.000
ζ	0.095	0.007	13.086	0.000
R^2 : 0.912				

4) 시간 이전성 검토 종합

본 연구에서 구축한 2차 함수 형태의 통행시간 신뢰성 추정 모형이 적합한지에 대해서 첨두, 비첨두, 심야 시간대로 구분하여 모형을 구축하였다. 시간대 별로 모형을 구축한 결과 모형의 결정계수는 각 시간대별로 차이는 존재하였지만 높게 추정되었다.

시간대별로 추정된 계수값을 살펴보면 링크길이에 따라서 계수값은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. L 을 나타내는 δ 값, L^2 을 나타내는 η 값 모두 시간대별로 큰 차이가 없고 이는 시간대별로 링크길이가 차이가 나지 않기 때문에 당연한 결과로 판단된다.

하지만 혼잡부분을 반영하는 MD계수인 β 값은 첨두, 비첨두, 심야시간대별로 다른 것을 알 수 있다. 변화하는 경향은 심야시간대로 갈수록 β 값은 커진다. 이는 시간대별로 혼잡을 반영하는 정도가 다르기 때문이라고 판단된다. 그리고 각 변수 값을 표준화하여 계수 값을 추정하는 표준화 계수로 살펴보면 MD의 표준화 계수 값이 첨두에서 심야시간대로 갈수록 적어지는 것을 알 수 있다. 이는 링크의 혼잡(MD)이 통행시간 표준편차에 영향을 주는 정도가 점차 적어지기 때문으로 이해할 수 있다.

<표 5-37> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 심야

구분	첨두		비첨두		심야	
	계수값	표준화 계수	계수값	표준화 계수	계수값	표준화 계수
α (상수)	-0.077	-	-0.086	-	-0.034	-
$\beta(MD)$	0.349	0.288	0.417	0.237	0.535	0.188
$\gamma(MD^2)$	-0.033	-0.047	-0.066	-0.051	-0.119	-0.032
$\delta(L)$	0.137	0.705	0.127	0.682	0.137	0.784
$\eta(L^2)$	0.002	0.101	0.003	0.156	0.001	0.059
$\zeta(HR)$	0.265	0.055	0.306	0.063	0.095	0.034

나. 공간이전성

1) 경부고속도로

① 통행관련 기초자료 분석

경부고속도로는 도시부와 지방부구간이 혼재한 도로로(도시부: 45.6%, 지방부: 54.4%) 도시부와 지방부의 특성을 모두 보여주는 고속도로이다. 그리고 차로수는 양방향 6차로인 구간이 47.4%, 8차로인 구간이 21.4%, 10차로인 구간이 22.6%의 구성비를 보여주는 고속도로이다.

평균통행속도는 86km/h이며, 평균 V/C는 0.31, 평균 통행시간 표준편차는 0.213분으로 나타났다.

<표 5-38> 통행관련 기초자료 분석결과: 경부

	통행시간 표준편차(분)	MD (분)	링크길이 (km)	CI	V/C	속도 (km/h)	통행 시간 (분)
평균	0.213	0.082	1.262	1.186	0.308	86.132	0.852
표준 편차	0.370	0.165	2.005	0.285	0.211	13.802	1.325
min	0.000	0.000	0.007	1.000	0.001	37	0.005
max	3.865	2.411	17.596	2.657	0.937	98.299	13.151
median	0.081	0.025	0.514	1.081	0.264	90.955	0.362
1사분위	0.035	0.008	0.231	1.029	0.109	83.841	0.166
3사분위	0.228	0.079	1.545	1.172	0.489	95.511	1.007

② 통행시간 신뢰성 추정모형 구축

경부고속도로에 대해서 아래와 같은 2차함수 형태의 통행시간 신뢰성 추정 모형을 구축한 결과는 <표 5-39>와 같다. 모형의 결정계수(R^2)는 0.943으로 비교적 높게 도출되었으며, 개별 파라미터에 대해서도 통계적으로 유의미하게 나왔다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 + \zeta TR \quad (5-26)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

HR : 중차량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta$: 파라미터

<표 5-39> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 경부

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	-0.070	0.004	-18.358	0.000
β	0.370	0.014	26.398	0.000
γ	-0.053	0.011	-4.887	0.066
δ	0.146	0.001	166.415	0.000
η	0.002	0.000	14.834	0.000
ζ	0.212	0.012	17.050	0.000

R^2 : 0.943

2) 경인고속도로

① 통행관련 기초자료 분석

경인고속도로는 도시부구간의 특성을(도시부: 100.0%) 보여주는 고속도로이다. 그리고 차로수는 양방향 6차로인 구간이 47.1%, 8차로인 구간이 52.9%의 구성비를 보여주는 고속도로이다.

평균통행속도는 83km/h이며, 평균 V/C는 0.50, 평균 통행시간 표준편차는 0.155분으로 나타났다. 평균통행속도는 경부고속도로 보다 낮으나 통행시간 표준편차는 낮은 것으로 나타났고, 이는 경부고속도로 보다 경인고속도로가 차량간의 통행속도가 비교적 균일하다고 볼 수 있다.

<표 5-40> 통행관련 기초자료 분석결과: 경인

	통행시간 표준편차 (분)	MD (분)	링크길이 (km)	CI	V/C	속도 (km/h)	통행 시간 (분)
평균	0.155	0.143	1.206	1.204	0.498	83.060	0.879
표준 편차	0.183	0.246	1.272	0.177	0.206	9.756	0.935
min	0.003	0.000	0.039	1.000	0.041	45.897	0.024
max	1.037	2.553	3.841	2.142	0.983	98.284	4.790
median	0.078	0.060	0.544	1.164	0.533	84.464	0.439
1사분위	0.025	0.012	0.235	1.088	0.332	78.382	0.156
3사분위	0.218	0.145	2.352	1.254	0.623	90.320	1.524

② 통행시간 신뢰성 추정모형 구축

경인고속도로에 대해서 아래와 같은 2차함수 형태의 통행시간 신뢰성 추정 모형을 구축한 결과는 <표 5-41>과 같다. 모형의 결정계수(R^2)는 0.911로 비교적 높게 도출되었으며, 개별 파라미터에 대해서도 통계적으로 유의미하게 나왔다. 다만 L^2 에 대한 파라미터 추정 결과는 유의도가 높지 않은 것으로 파악된다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 + \zeta TR \quad (5-27)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

HR : 중차량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta$: 파라미터

<표 5-41> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 경인

구분	추정값	표준오차	t	유의 확률
α	-0.032	0.012	-2.809	0.005
β	0.399	0.022	18.104	0.000
γ	-0.038	0.012	-3.182	0.002
δ	0.076	0.007	10.267	0.000
η	0.002	0.002	1.196	0.232
ζ	0.164	0.055	2.977	0.003
R^2 : 0.911				

3) 서해안고속도로

① 통행관련 기초자료 분석

서해안고속도로는 주로 지방부구간의 특성을(지방부: 84.1%, 도시부: 15.9%) 보여주는 고속도로이다. 그리고 차로수는 양방향 4차로인 구간이 74.4%, 6차로인 구간이 20.8%의 구성비를 보여주는 고속도로이다.

평균통행속도는 89km/h이며, 평균 V/C는 0.28, 평균 통행시간 표준편차는 0.288분으로 나타났다. 평균통행속도는 경부고속도로와 비슷하나 통행시간 표준편차는 높은 것으로 나타났고, 이는 경부고속도로 보다 서해안고속도로가 차량간의 통행속도가 비교적 균일하지 않다고 볼 수 있다.

<표 5-42> 통행관련 기초자료 분석결과: 서해안

	통행시간 표준편차 (분)	MD (분)	링크길이 (km)	CI	V/C	속도 (km/h)	통행 시간 (분)
평균	0.288	0.124	1.524	1.134	0.284	88.638	1.055
표준 편차	0.394	0.289	1.813	0.200	0.208	11.175	1.237
min	0.007	0.000	0.051	1.000	0.012	44.079	0.032
max	2.600	3.125	11.019	2.230	0.907	98.281	7.702
median	0.168	0.032	0.924	1.061	0.248	92.623	0.658
1사분위	0.077	0.010	0.440	1.021	0.088	85.704	0.309
3사분위	0.311	0.109	1.849	1.147	0.465	96.256	1.227

② 통행시간 신뢰성 추정모형 구축

서해안고속도로에 대해서 아래와 같은 2차함수 형태의 통행시간 신뢰성 추정 모형을 구축한 결과는 <표 5-43>과 같다. 모형의 결정계수(R^2)는 0.935로 비교적 높게 도출되었으며, 개별 파라미터에 대해서도 통계적으로 유의미하게 추정되었다. 다만 MD^2 에 대한 파라미터 γ 의 통계적 유의도는 높지 않은 것으로 보인다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 + \zeta TR \quad (5-28)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

HR : 중차량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta$: 파라미터

<표 5-43> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 서해안

구분	추정값	표준오차	t	유의 확률
α	-0.122	0.012	-10.076	0.000
β	0.234	0.020	11.729	0.000
γ	-0.002	0.009	-0.279	0.781
δ	0.134	0.004	37.106	0.000
η	0.007	0.000	18.279	0.000
ζ	0.523	0.043	12.092	0.000
R^2 : 0.935				

4) 영동고속도로

① 통행관련 기초자료 분석

영동고속도로는 지방부구간과 도시부구간이 혼재된(지방부: 38.7%, 도시부: 61.3%)고속도로이다. 그리고 차로수는 양방향 4차로인 구간이 40.1%, 6차로인 구간이 30.1%, 8차로인 구간이 23.9%의 구성비를 보여주는 고속도로이다.

평균통행속도는 89km/h이며, 평균 V/C는 0.32, 평균 통행시간 표준편차는 0.207분으로 나타났다. 평균통행속도는 경부고속도로와 비슷하고 통행시간 표준편차역시 비슷한 것으로 나타났다. 이는 경부고속도로와 영동고속도로가 차량간의 통행속도가 분포가 비교적 비슷하다고 볼 수 있다.

<표 5-44> 통행관련 기초자료 분석결과: 영동

	통행시간 표준편차 (분)	MD (분)	링크길이 (km)	CI	V/C	속도 (km/h)	통행 시간 (분)
평균	0.207	0.082	1.198	1.114	0.317	89.324	0.813
표준 편차	0.303	0.160	1.478	0.141	0.238	8.689	1.000
min	0.000	0.000	0.007	1.000	0.003	47.793	0.004
max	2.168	2.233	9.345	2.057	1.295	98.287	6.406
median	0.108	0.027	0.666	1.069	0.285	91.927	0.467
1사분위	0.044	0.007	0.291	1.032	0.102	86.320	0.192
3사분위	0.222	0.079	1.350	1.139	0.499	95.224	0.948

② 통행시간 신뢰성 추정모형 구축

영동고속도로에 대해서 아래와 같은 2차함수 형태의 통행시간 신뢰성 추정 모형을 구축한 결과는 <표 5-45>와 같다. 모형의 결정계수(R^2)는 0.899으로 도출되었으며, 개별 파라미터에 대해서도 통계적으로 유의미하게 추정되었다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 + \zeta TR \quad (5-29)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

HR : 중차량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta$: 파라미터

<표 5-45> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 영동

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	0.061	0.008	7.748	0.000
β	0.890	0.021	43.038	0.000
γ	-0.324	0.015	-21.281	0.000
δ	0.110	0.003	40.214	0.000
η	0.006	0.000	15.735	0.000
ζ	0.291	0.032	9.245	0.000

R^2 : 0.899

5) 중부고속도로

① 통행관련 기초자료 분석

중부고속도로는 지방부구간과 도시부구간이 혼재된(지방부: 85.9%, 도시부: 14.1%)고속도로이다. 그리고 차로수는 양방향 4차로인 구간이 90.6%, 6차로인 구간이 2.1%, 8차로인 구간이 3.7%의 구성비를 보여주는 고속도로이다.

평균통행속도는 91km/h이며, 평균 V/C는 0.39, 평균 통행시간 표준편차는 0.169분으로 나타났다. 평균통행속도는 경부고속도로 보다 높고, 통행시간 표준편차는 낮은 것으로 나타났다. 이는 경부고속도로 보다 중부고속도로가 차량간의 통행속도가 비교적 균일하다고 볼 수 있다.

<표 5-46> 통행관련 기초자료 분석결과: 중부

	통행시간 표준편차 (분)	MD (분)	링크길이 (km)	CI	V/C	속도 (km/h)	통행 시간 (분)
평균	0.169	0.049	1.183	1.073	0.386	91.964	0.771
표준 편차	0.272	0.104	1.741	0.075	0.205	5.511	1.134
min	0.001	0.000	0.012	1.000	0.028	61.392	0.007
max	1.977	1.736	8.785	1.601	0.830	98.294	6.487
median	0.065	0.016	0.469	1.053	0.433	93.353	0.308
1사분위	0.030	0.005	0.254	1.025	0.191	89.808	0.166
3사분위	0.179	0.047	1.462	1.095	0.562	95.874	0.974

② 통행시간 신뢰성 추정모형 구축

중부고속도로에 대해서 아래와 같은 2차함수 형태의 통행시간 신뢰성 추정 모형을 구축한 결과는 <표 5-47>과 같다. 모형의 결정계수(R^2)는 0.920으로 비교적 높게 도출되었으며, 개별 파라미터에 대해서도 통계적으로 유의미하게 추정되었다. 다만 MD^2 에 대한 파라미터 γ 과 L^2 에 대한 파라미터 η 의 통계적 유의도는 높지 않은 것으로 보인다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 + \zeta TR \quad (5-30)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

HR : 중차량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta$: 파라미터

<표 5-47> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 중부

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	-0.094	0.009	-10.192	0.000
β	0.472	0.032	14.690	0.000
γ	0.029	0.031	0.915	0.360
δ	0.124	0.003	46.092	0.000
η	0.000	0.000	1.308	0.191
ζ	0.319	0.032	9.867	0.000

R^2 : 0.920

6) 중부내륙고속도로

① 통행관련 기초자료 분석

중부내륙고속도로는 지방부구간(지방부: 100.0%)고속도로이다. 그리고 차로수는 양방향 4차로인 구간이 100%의 구성비를 보여주는 고속도로이다.

평균통행속도는 92km/h이며, 평균 V/C는 0.20, 평균 통행시간 표준편차는 0.159분으로 나타났다. 평균통행속도는 경부고속도로 보다 높고, 통행시간 표준편차는 낮은 것으로 나타났다. 이는 경부고속도로 보다 중부내륙고속도로가 차량간의 통행속도가 비교적 균일하다고 볼 수 있다.

<표 5-48> 통행관련 기초자료 분석결과: 중부내륙

	통행시간 표준편차 (분)	MD (분)	링크길이 (km)	CI	V/C	속도 (km/h)	통행 시간 (분)
평균	0.159	0.040	0.999	1.067	0.199	92.397	0.650
표준 편차	0.245	0.082	1.440	0.056	0.172	4.505	0.937
min	0.002	0.000	0.018	1.000	0.002	74.381	0.011
max	1.955	1.044	13.626	1.322	0.735	98.300	9.217
median	0.071	0.013	0.472	1.055	0.141	93.179	0.301
1사분위	0.032	0.005	0.208	1.027	0.060	90.283	0.134
3사분위	0.172	0.037	1.090	1.089	0.309	95.750	0.686

② 통행시간 신뢰성 추정모형 구축

중부내륙고속도로에 대해서 아래와 같은 2차함수 형태의 통행시간 신뢰성 추정 모형을 구축한 결과는 <표 5-49>와 같다. 모형의 결정계수 (R^2)는 0.835로 다른 고속도로와 비교하여 낮게 도출되었다. 개별 파라미터에 대해서도 통계적으로 유의미하게 추정되었다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 + \zeta TR \quad (5-31)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

HR : 중차량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta$: 파라미터

<표 5-49> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 중부내륙

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	-0.036	0.004	-8.714	0.000
β	0.568	0.043	13.122	0.000
γ	0.425	0.061	6.919	0.000
δ	0.150	0.002	62.574	0.000
η	-0.004	0.000	-16.449	0.000
ζ	0.099	0.012	8.547	0.000

R^2 : 0.835

7) 호남고속도로

① 통행관련 기초자료 분석

호남고속도로는 지방부구간과 도시부구간이 혼재된(지방부: 77%, 도시부: 23%)고속도로이다. 그리고 차로수는 양방향 4차로인 구간이 91.1%, 6차로인 구간이 6.6%의 구성비를 보여주는 고속도로이다.

평균통행속도는 91km/h이며, 평균 V/C는 0.20, 평균 통행시간 표준편차는 0.157분으로 나타났다. 평균통행속도는 경부고속도로 보다 높고, 통행시간 표준편차는 낮은 것으로 나타났다. 이는 경부고속도로 보다 호남고속도로가 차량간의 통행속도가 비교적 균일하다고 볼 수 있다.

<표 5-50> 통행관련 기초자료 분석결과: 호남

	통행시간 표준편차 (분)	MD (분)	링크길이 (km)	CI	V/C	속도 (km/h)	통행 시간 (분)
평균	0.157	0.054	0.983	1.093	0.202	90.820	0.654
표준 편차	0.228	0.104	1.264	0.126	0.164	7.592	0.832
min	0.002	0.000	0.023	1.000	0.008	44.119	0.015
max	1.408	1.379	7.804	2.228	1.404	98.292	4.951
median	0.060	0.013	0.435	1.059	0.178	92.786	0.287
1사분위	0.021	0.004	0.151	1.025	0.058	87.751	0.098
3사분위	0.195	0.053	1.262	1.120	0.307	95.907	0.898

② 통행시간 신뢰성 추정모형 구축

호남고속도로에 대해서 아래와 같은 2차함수 형태의 통행시간 신뢰성 추정 모형을 구축한 결과는 <표 5-51>과 같다. 모형의 결정계수(R^2)는 0.915로 비교적 높게 도출되었다. 개별 파라미터에 대해서도 통계적으로 유의미하게 추정되었다. 다만 α MD^2 에 대한 파라미터 γ 의 통계적 유의도는 높지 않은 것으로 보인다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 + \zeta TR \quad (5-32)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

HR : 중차량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta$: 파라미터

<표 5-51> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 호남

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	-0.058	0.006	-10.386	0.000
β	0.104	0.025	4.093	0.000
γ	-0.021	0.038	-0.537	0.591
δ	0.142	0.003	55.367	0.000
η	0.006	0.000	11.721	0.002
ζ	0.211	0.020	10.395	0.000

R^2 : 0.915

8) 서울외곽순환고속도로

① 통행관련 기초자료 분석

서울외곽순환고속도로는 도시부구간에 주로 위치한(도시부: 90%, 도시부: 10%)고속도로이다. 그리고 차로수는 양방향 8차로인 구간이 92.5%, 6차로인 구간이 2.5%, 10차로인 구간이 2.5%의 구성비를 보여주는 고속도로이다.

평균통행속도는 81.9km/h이며, 평균 V/C는 0.52, 평균 통행시간 표준편차는 0.147분으로 나타났다. 평균통행속도는 경부고속도로 보다 낮고, 통행시간 표준편차도 낮은 것으로 나타났다. 이는 경부고속도로 보다 혼잡하지만 서울외곽순환고속도로의 차량 간 통행속도가 비교적 균일하다고 볼 수 있다.

<표 5-52> 통행관련 기초자료 분석결과: 외곽순환

	통행시간 표준편차 (분)	MD (분)	링크길이 (km)	CI	V/C	속도 (km/h)	통행 시간 (분)
평균	0.147	0.127	0.961	1.231	0.518	81.937	0.713
표준 편차	0.173	0.210	1.042	0.219	0.264	11.923	0.769
min	0.001	0.000	0.012	1.000	0.002	40.687	0.007
max	1.375	2.942	5.866	2.416	1.726	98.257	5.505
median	0.088	0.055	0.615	1.160	0.530	84.717	0.444
1사분위	0.042	0.019	0.319	1.075	0.365	74.603	0.229
3사분위	0.174	0.146	1.156	1.318	0.692	91.433	0.883

② 통행시간 신뢰성 추정모형 구축

서울외곽순환고속도로에 대해서 아래와 같은 2차함수 형태의 통행시간 신뢰성 추정 모형을 구축한 결과는 <표 5-53>과 같다. 모형의 결정계수 (R^2)는 0.909로 도출되었다. 개별 파라미터에 대해서도 통계적으로 유의미하게 추정되었다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 + \zeta TR \quad (5-33)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

HR : 중차량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta$: 파라미터

<표 5-53> 통행시간 신뢰성 모형 계수 분석결과 및 결정계수: 외곽순환

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	-0.031	0.005	-6.665	0.000
β	0.495	0.009	57.625	0.000
γ	-0.060	0.005	-10.943	0.000
δ	0.101	0.002	40.957	0.000
η	-0.002	0.001	-3.104	0.002
ζ	0.102	0.018	5.746	0.000

R^2 : 0.909

제6장 통행시간 신뢰성 비용 산정

제1절 통행비용 산정 개요

1. 통행비용 산정 원리

일반적으로 비용은 생산자가 생산 활동을 계속하기 위해서 지불하여야 하는 것이며, 생산비용 규모에 따라서 총비용, 평균비용, 한계비용으로 분류할 수 있다(이번송, 손의영, 홍성호, 교통경제학).

그리고 통행비용은 이동의 주체가 통행에서 소요되는 시간 및 금전적 지불 금액 등을 의미한다. 통행비용 또한 일반적인 비용과 마찬가지로 총비용, 평균비용, 한계비용을 고려 할 수 있다. 총 통행비용은 전체이용자가 지불하는 모든 비용을 합하여 얻어지는 비용이다. 평균비용은 개별 통행주체가 단위당 비용이며, 총비용을 총통행량으로 나눔으로써 산출한다. 한계비용은 개별통행자 1단위가 증가할 때마다 발생하는 총비용을 의미한다. 한계비용은 총 통행비용에서 개별 통행량으로 미분함으로써 산출되고, 이는 개별 통행주체가 통행을 시작함에 따라서 해당 링크 또는 네트워크에서 증가하는 총비용으로 이해할 수 있다.

기본적으로 평균비용과 한계비용을 산정하는 방법은 (식 6-1)과 (식 6-2)와 같다.

$$AC_t(q) = \frac{TC_t(q)}{q_t} \quad (6-1)$$

$$MC_t(q) = \frac{\partial TC_t(q)}{\partial q_t} \quad (6-2)$$

여기서,

TC : 총 통행비용

AC : 평균 통행비용

MC : 한계 통행비용

q : 링크 교통량 또는 v/c

t : 시간대(침두, 비침두)

총 통행비용의 구성은 대표 통행수단을 결정해야 하며 그에 따라서 비용항목을 정할 수 있다. 본 연구에서는 고속도로를 대상으로 하고 있으므로, 개인 승용차를 대표수단으로 정하고, 승용차 소유와 관련한 비용은 고려하지 않고, 오로지 승용차 운행과 관련한 비용들로만 총 통행비용항목을 구성한다.

승용차 운행과 관련한 비용들은 개인이 지불하는 개인비용과 개인은 지불하지 않지만 사회적으로 소요되는 비용을 구분한다. 즉 총 개인 총 통행비용과 사회적 총 통행비용을 분리하는 것이다. 예를 들어 유류세의 경우는 개인이 승용차 운행을 위해서 반드시 지불하는 금액이지만 사회적 관점에서는 이전수입이므로 비용으로 사회적 비용에는 포함하지 않는다. 반면에 대기오염 및 소음 비용은 개인이 승용차 운행에서 지불하는 금액은 아니지만 사회적으로 보았을 때 손실이 가는 부분이 있으므로 사회적 비용으로 포함한다.

개인 비용은 평균비용으로 간주하여 비용을 산정하고, 사회적 비용은 한계비용으로 통행비용을 산정한다. 개인 비용이 평균비용인 이유는 이용자가 통행에 직접 지불하는 비용은 평균비용에 근거하기 때문이다. 통행시간을 예로 들면, 개인이 이동하는 데 소요되는 시간만을 고려할 뿐 개인의 통행으로 인하여 다른 이동주체의 통행시간이 증가되는 부분은 고려되지 않기 때문이다. 반면에 사회적 비용은 평균 통행비용이 아닌 한계비용 관점에서 분석해야 한다. 개인의 통행으로 인하여 다른 이동주

체의 비용이 증가하였다면 이는 사회적 관점에서 반영해 주어야하기 때문이다. 이를 바탕으로 총통행비용 식을 구축하면 다음과 같다.

$$TC_p = TTC_a + MAC_a + T + TRC_a \quad (6-3)$$

여기서,

TC_p : 총 개인 통행비용

TTC_a : 통행시간 비용

MAC : 차량운행 비용

T : 유류세

TRC_a : 통행시간 신뢰성 비용

a : 평균비용

$$TC_s = TTC_m + MAC_m + APC_m + NC + ACC + TRC_m \quad (6-4)$$

여기서,

TC_s : 총 사회적 통행비용

TTC_m : 통행시간 비용

MAC : 차량운행 비용

APC_m : 대기오염 비용

NC : 소음 비용

ACC : 교통사고 비용

TRC_a : 통행시간 신뢰성 비용

m : 한계비용

2. 통행비용 항목

본 연구에서 고려하는 통행비용 항목을 정리하면 다음 <표 6-1>과 같다.

<표 6-1> 통행비용 구분

비용	개인 비용	사회적 비용
통행시간 비용	○	○
차량운행 비용	○	○
유류세	○	X
대기오염 비용	X	○
도로소음 비용	X	○
교통사고 비용	X	○
통행시간 신뢰성 비용	○	○

통행시간 비용 산정은 통행시간과 통행시간 가치를 이용한다. 통행시간은 KTDB(2018)의 자료를 이용하여 산정한다. KTDB(2018)에서는 교통량-용량비율(V/C)을 바탕으로 통행시간을 산정하는 기본식을 제공하고 있다. 그리고 통행시간 가치는 KDI(2013)의 연구를 이용한다. KDI(2013)의 연구에서는 권역별, 차종별 시간가치를 제공하고 있고, 2017년 시간가치로 환산하기 위한 디플레이터로는 한국은행 경제통계시스템에서 제공하는 CPI(Consumer Price Index)를 이용한다.

차량운행 비용과 대기오염 비용, 도로소음 비용은 국토교통부(2017)의 지침을 활용한다. 국토교통부(2017)의 지침에서는 차종별, 속도별 비용원단위를 제시하고 있고, 본 연구는 제시된 원단위를 바탕으로 3차회귀식을 추정하여 적용한다.

통행시간 신뢰성 비용은 통행시간 신뢰성 지표와 통행시간 신뢰성 가치를 이용하여 산정한다. 통행시간 신뢰성 비용 산정방법은 다음 장에서 자세히 기술한다. 통행시간 신뢰성 가치는 국토교통부(2009)의 지침을 참고한다. 국토교통부(2009)의 연구에서는 도시부, 지역간 통행 별로 통행시간 신뢰성 비율을 산정하였다.

3. 통행시간 신뢰성 비용 산정 방법

본 연구에서는 통행시간 신뢰성 비용 외에는 기존의 연구에서 제시하는 방법을 이용한다. 그리고 통행시간 신뢰성 비용은 본 연구에서 제시한 통행시간 신뢰성 지표 추정 모형에 통행시간 신뢰성 가치를 이용하여 통행시간 신뢰성 비용을 산정한다. 통행시간 신뢰성 지표 추정모형에서 통행시간 신뢰성 부분을 설명하는 종속변수 통행시간 표준편차로 제시하였다. 통행시간 신뢰성 가치는 통행시간 신뢰성 비율(Reliability Ratio)과 KDI(2013)에서 제시한 통행시간 가치를 이용하여 산정하였다.

통행시간 신뢰성 비용은 통행시간 신뢰성 지표인 통행시간 표준편차와 통행시간 신뢰성 가치의 곱으로 산정한다. 통행시간 신뢰성 지표(통행시간 표준편차)는 링크의 평균지체(Mean Delay)와 링크길이, 중차량 비율, 차로수에 따라서 산정한다. 통행시간 신뢰성 가치는 통행시간 가치와 신뢰성 비율을 이용하여 산정한다.

$$TRC = \sigma \times VOR \quad (6-5)$$

여기서,

σ : 통행시간 표준편차(분)

VOR : 통행시간 신뢰성 가치

TRC : 통행시간 신뢰성 비용

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 + \zeta HR$$

$$VOR = VOT \times RR$$

VOT : 통행시간 가치, RR : 신뢰성 비율

예를 들어 통행시간 신뢰성 지표 모형식에서 계산한 통행시간 표준편차가 0.2분으로 산정되었으면, 여기에 승용차 기준의 통행시간 신뢰성 가치인 212.4원/분을 곱하여 42.48원이 통행시간 신뢰성 비용이 되는 것이다.

제2절 통행시간 신뢰성 비용 산정 방법 및 자료

1. 통행비용 산정 방법

1) 통행시간비용

통행시간비용 산정은 한국개발연구원(2017)에서 제시하는 VDF함수 형태를 이용한다. VDF 함수는 미 공로국(Bureau of Public Road)에서 개발한 함수 형태이며, 이를 통하여 링크 통행시간을 산정한다.

$$T = T_0 [1 + \alpha (\frac{V}{C})^\beta] \quad (6-6)$$

여기서,

T : 링크 통행시간

T_0 : 링크 기준통행시간

V : 링크 교통량(PCU/시)

C : 링크 용량(PCU/시)

α, β : 파라미터

VDF 함수 형태는 식 (4-3)과 같으며, α, β 파라미터 값과 링크 기준속도 값은 KTDB(2018)의 고속도로 VDF 3(도시부, 3차로 이상)을 준용한다. VDF 함수를 이용하면 V/C 에 따른 링크 평균속도 및 링크 평균 통행시간을 파악할 수 있다. 링크 평균 통행시간에 통행시간가치를 곱하여 통행시간비용을 산정한다.

통행시간가치는 한국개발연구원(2013)의 연구를 참고하며, 2013년 기준으로 제시된 값을 한국은행 물가지수를 이용하여 2018년 기준으로 보정하였다. 본 연구에서 적용한 통행시간가치 는 <표 6-2>에 제시되어 있다.

<표 6-2> 통행시간가치(수도권, 2018년)

구분	승용차		버스		화물차	
	업무	비업무	업무	비업무	업무	비업무
재차인원(인)	0.22	1.02	1.23	13.26	1.00	-
시간가치(원)	22,775	9,748	17,260(1인) 22,775(0.23인)	5,011	16,374	-
시간가치(원/대·시)	5,011	9,943	22,498	66,446	16,374	-
2013년 기준 평균 시간가치(원/대)	14,954		88,944		16,374	
2018년 기준 평균 시간가치(원/대)	15,930		94,752		17,443	

자료: 한국개발연구원(2013) 수정

2013년 기준의 시간가치를 2013년과 2018년의 물가지수 비율인 1.0653을 이용하여 2018년 기준 시간가치로 보정하였다.

<표 6-3> C.P.I. Index

년도	2013	2014	2015	2016	2017	2018
물가지수 (2015=100)	98.048	99.298	100	100.97	102.93	104.45

자료: 한국은행 경제통계시스템(ecos.bok.or.kr)

VDF 함수식에서 결과로 제시되는 값은 링크 평균속도(시간)이며, 여기에 시간가치를 곱하여 평균비용을 산정한다. 한계 통행시간은 VDF 함수식에 교통량 V 를 곱하고, 이를 V 에 대해서 미분을 하면 한계 통행시간이 계산되고 여기에 시간가치를 곱하여 한계비용을 산정한다. 평균 시간비용은 링크 내에 차량들이 동일하게 소비하는 시간이며, 한계 시간비용은 차량 1대 유입으로 인하여 증가되는 통행시간 비용을 의미한다.

2) 차량 운행비용 및 유류세

한국개발연구원(2017)에서 제시된 차종별·속도별 비용원단위를 바탕으로 차량 운행비용추정식을 구축하였다. 차량 운행비용추정식은 통행속도 10km/h 단위로 제시된 원단위 값을 이용하여 3차 곡선 형태로 도출하였다. 한국개발연구원(2017)에서 제시하는 차량운행비용 항목에 포함되는 비용은 유류비, 엔진오일비, 타이어마모비, 유지관리비, 감가상각비이다.

본 연구에서 감가상각비는 제외하고 유류비와 차량관리비용(엔진오일비+타이어마모비+유지관리비)에 대하여 통행속도별 비용 추정식을 구축하였다. 본 연구에서감가상각비를 제외한 이유는 장기적인 관점에서의 분석이 아니기 때문이다.

유류비용과 차량관리비용을 분리한 이유는 통행속도별 변화 패턴이 다르기 때문이며, 유류비용을 유류세와 유류비로 분리해야하기 때문이다. 유류세는 사회적 관점에서는 이전 지출이기 때문에 비용으로 판단하지 않으나, 개인적 관점에서는 분명히 지출하는 비용이기 때문에 비용으로 포함시킨다. 유류비용 중 유류세를 제외한 비용은 개인적으로도 소모되고, 사회적으로도 소모되는 비용이므로 사회적 관점과 개인적 관점에서 비용으로 포함한다. 유류비용 중 유류세의 비율은 한국석유공사 가격자료(<http://www.opinet.co.kr>)를 이용하였다.

차량속도를 독립변수로, 승용차 유류비용 또는 차량관리비용(엔진오일비+타이어마모비+유지관리비)을 종속변수로 하는 3차 곡선 형태의 모형식은 다음과 같다.

$$Y_a = a_0 + a_1 V + a_2 V^2 + a_3 V^3 \quad (6-7)$$

여기서,

Y_a : 승용차 유류비용 또는 차량관리비용

V : 차량 속도(km/h)

a_0, a_1, a_2, a_3 : 파라미터

본 연구에서는 승용차로만 구성된 상황을 우선적으로 고려하기 때문에 차종은 승용차로 한정하여 분석하였다. 하지만 현실적으로는 버스 및 트럭의 차종도 함께 고려해야 하며, 이는 5장에서 추가 검토할 것이다.

유류비용 또는 차량관리비용(엔진오일비+타이어마모비+유지관리비) 추정식에서 개별 파라미터를 분석한 결과는 다음 <표 6-4>, <표 6-5>와 같다.

<표 6-4> 유류비용 추정식 파라미터 분석결과

범위	추정값	표준오차	t-value	유의확률
a_0	159.22	9.18	17.34	0.00
a_1	-4.42	0.59	-7.53	0.00
a_2	0.05	0.01	4.96	0.00
a_3	-0.0001	0.00	-3.33	0.01
$R^2 = 0.980, adj R^2 = 0.946$				

<표 6-5> 차량관리비용 추정식 파라미터 분석결과

범위	추정값	표준오차	t-value	유의확률
a_0	8.42	0.716	11.762	0.00
a_1	0.32	0.046	6.958	0.00
a_2	-0.003	0.001	-3.783	0.01
a_3	0.00002	0.00	6.074	0.00
$R^2 = 0.980, adj R^2 = 0.946$				

3) 대기오염비용

한국개발연구원(2017)에서 제시한 차종별·속도별 대기오염비용 원단위를 바탕으로 도로 대기오염비용 추정식을 구축하였다. 도로 대기오염비용 추정식은 통행속도 10km/h 단위로 제시된 원단위 값을 이용하여 3차 곡선 형태로 도출하였다. 한국개발연구원(2017)에서 제시하는 대기오염비용 항목에 포함되는 물질은 CO, NOx, VOC, PM2.5, CO2이다.

차량속도를 독립변수로, 승용차 대기오염비용을 종속변수로 하는 3차 곡선 형태의 모형식은 다음과 같다.

$$Y_p = a_0 + a_1 V + a_2 V^2 + a_3 V^3 \quad (6-8)$$

여기서,

Y_p : 대기오염 비용

V : 차량 속도(km/h)

a_0, a_1, a_2, a_3 : 파라미터

대기오염비용 추정식에서 개별 파라미터를 분석한 결과는 다음 <표 6-6>과 같다.

<표 6-6> 대기오염비용 추정식 파라미터 추정결과

범위	추정값	표준오차	t-value	유의확률
a_0	45.03	2.073	21.72	0.00
a_1	-1.35	0.155	-8.70	0.00
a_2	0.019	0.003	5.78	0.00
a_3	-0.00009	0.00	-4.49	0.00
$R^2 = 0.946, adj R^2 = 0.926$				

4) 교통사고 및 도로소음비용

교통사고비용은 교통사고로 인하여 받은 경제적 손실을 화폐가치로 환산한 것이다. 본 연구에서는 한국개발연구원(2017)에서 제시하는 도로유형별 교통사고 발생비율과 도로부문 교통사고 비용 원단위를 바탕으로 산정하였다. 도로유형별 교통사고 발생비율에서는 1억대km당 사망자수로 제시되어 있으며, 이를 원/대-km로 환산하여 적용하였다.

<표 6-7> 교통사고비용 추정결과

	1억대km당 피해 (인, 건)	사고비용 원단위 (만원/인, 만원/건)	사고비용 (원/대-km, 2015년 기준)	사고비용 (원/대-km, 2018년 기준)
사망자수	0.46	72,230	3.326	3.470
부상자수	42.28	1,905	8.054	8.413
차량손해	48.82	163	0.796	0.831
대물피해	49.16	172	0.846	0.883
합계			13.018	13.598

도로소음비용은 차량 이동으로 인하여 발생하는 소음을 금전적 가치로 환산한 것이다. 도로소음비용은 한국개발연구원(2017)에서 제시하는 고속도로의 소음예측식과 소음비용 원단위를 이용하여 산정한다.

$$L_{eq}(\text{등가소음도}(dB)) = PWL + 10\log\left(\frac{1}{4 \times d \times s}\right) + \Delta L_i + a_i + ad \quad (6-9)$$

여기서,

PWL : $73.4 + [20\log(V) + 10\log(a + 3.8b)]$

a, b : 소형차 및 대형차 비율($a+b=1$)

$\Delta L_i, a_i, ad$: 도로교통 소음도의 보정치로서 '0'으로 처리

d : 음원에서 수음점까지 거리(m)(도시부:27.9, 지방부:59.0)

s : 평균 차두간격($1,000 \times \frac{\text{차량주행속도}(km/h)}{\text{평균 교통량}(대/h)}$)

도로소음비용 원단위는 도시부 4,752원/dB·m·년(2018년기준)을 기준으로 하였다. 산정된 등가소음도 72.57dB에 소음비용원단위를 곱하여 1시 이용하여 유료도로 통행수요-요금탄력도를 계산하였다.

2. 통행비용 산정 자료

1) 분석대상구간

분석대상으로 지정한 도로는 서울외곽순환고속도로이다. 서울외곽순환고속도로는 경기도 성남시 판교분기점을 기점으로 하여 서울시, 경기도, 인천시를 순환하는 왕복 8차로 고속도로이다(하남~강일은 10차로). 총 연장은 128.02km이며, 퇴계원 나들목~일산 나들목 구간(36.3km)은 민자 운영기관이, 그 외의 구간은 한국도로공사에서 관리한다.

본 연구에서는 서울외곽순환고속도로 전구간을 분석하며 운영주체, 요금수준이 다른 재정구간과 민자구간을 분리하여 분석을 실시한다. 본 연구에서는 편의상 재정구간을 남부구간, 민자구간을 북부구간으로 한다.



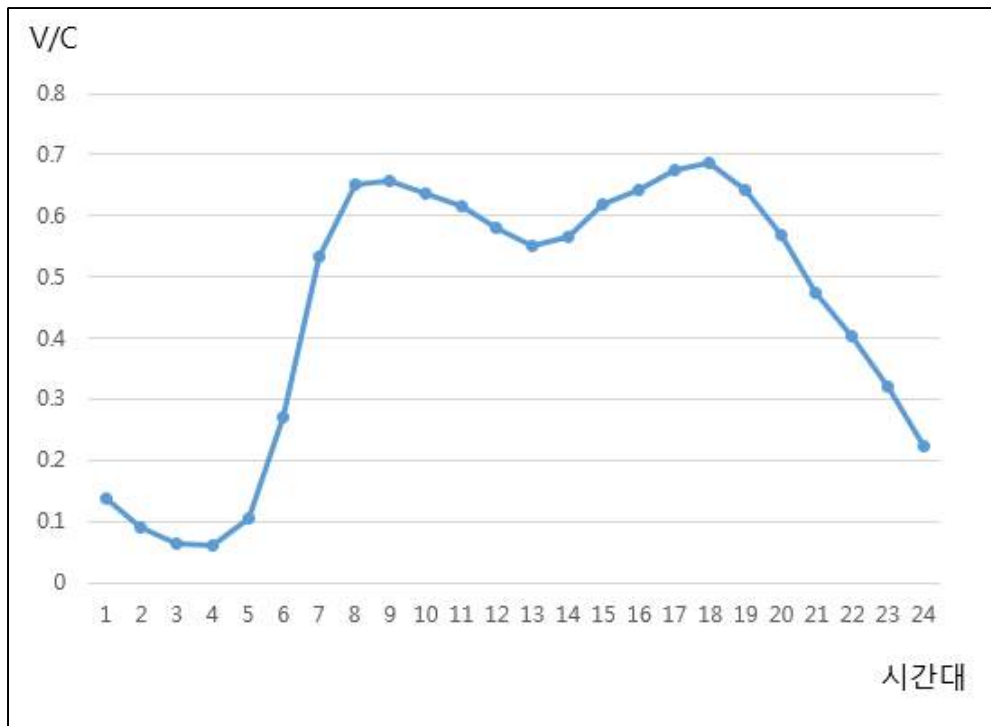
<그림 6-1> 서울외곽순환고속도로

자료: 서울고속도로 주식회사(<https://www.seoulbeltway.co.kr>)

2) 서울외곽순환고속도로 통행특성

서울외곽순환고속도로의 시간대별 교통량은 View-T 1.0자료를 이용하였으며, 각 링크별 교통량을 시간대별 평균 교통량으로 집계하였다. 시간대별 교통량-용량비(v/c)산정을 위한 용량은 View-T 1.0에 제시된 링크 VDF체계와 KTDB(2018)에서 제시한 VDF에 따른 최적 용량을 매칭하였다. KTDB(2018)에서 제시하는 VDF 3번 등급을 참고로 하였으며, 서울외곽순환고속도로의 용량은 차로당 2028pcu/시/lane로 적용하였다.

서울외곽순환고속도로의 시간대별(0시~23시) V/C를 산정하여 보면 다음과 같다.



<그림 6-2> 서울외곽순환고속도로 시간대별 V/C

서울외곽순환고속도로의 시간대별 v/c를 살펴보면 오전 6시부터 급격히 증가하며, 오전 7시부터 오후 8시까지 지속적으로 0.5이상의 값을 보

여주는 것으로 나타났다. 가장 혼잡한 시간대는 오후5시~7시인 것으로 나타났으며, 심야시간대는 평균적으로 0.2이하의 값을 보인다.

시간대별 통행비용 추정을 위해 첨두, 비첨두, 심야로 구분하며 시간대별 지속시간은 한국개발연구원(2017) 자료를 이용하여 시간대별로 평균 V/C를 산정하였다.

<표 6-8> 광역권, 지역간, 수도권에 따른 지속시간 및 집중률

구분	광역권		지역간		수도권 ¹⁴⁾	
	지속시간	집중률	지속시간		지속시간	
첨두	4	8.48%	10	7%	5	8.96
비첨두	16	3.78%	9	2.5%	14	3.84
심야	4	-	5	-	5	-

자료: 한국개발연구원(2017)

<표 6-8>에서 제시된 각기 다른 3가지(광역권, 지역간, 수도권) 지속시간을 바탕으로 시간대별 평균 V/C를 산정하였다.

<표 6-9> 서울외곽순환 고속도로 첨두-비첨두-심야 평균 V/C

구분	광역권		지역간		수도권	
	V/C	지속시간	V/C	지속시간	V/C	지속시간
첨두	0.67	4	0.64	10	5	0.66
비첨두	0.49	16	0.43	9	14	0.49
심야	0.08	4	0.09	5	5	0.09

서울외곽순환고속도로는 서울시 인근에 위치하여 광역권으로 분석하는 것이 타당하지만 통행 행태를 살펴보면 첨두 지속시간이 지역간 도로와 흡사한 형태를 보이기 때문에 지역간 도로의 지속시간 값을 이용하여 첨두, 비첨두 시간대별 평균 v/c를 산정한다. 추가적으로 본 연구에서는 민자구간과 재정구간을 구분하여 분석하기 때문에 서울외곽순환고속도로의 남부, 북부구간의 시간대별 V/C를 산정하여 적용한다.

14) 한국교통연구원, “2015년 KTDB 제4권 여객교통수요 신뢰도 개선방안 연구”에서 제시한 내용을 한국개발연구원(2017)에서 인용함

<표 6-10> 서울외곽순환 고속도로 시간대별 평균 V/C

시간대	남부	북부
0	0.176	0.095
1	0.112	0.062
2	0.078	0.048
3	0.069	0.052
4	0.097	0.115
5	0.273	0.271
6	0.575	0.482
7	0.724	0.555
8	0.716	0.576
9	0.707	0.553
10	0.698	0.520
11	0.664	0.483
12	0.620	0.472
13	0.642	0.475
14	0.683	0.545
15	0.693	0.580
16	0.710	0.634
17	0.735	0.631
18	0.710	0.565
19	0.653	0.468
20	0.555	0.379
21	0.487	0.304
22	0.397	0.228
23	0.282	0.152
첨두 평균	0.70	0.56
비첨두 평균	0.50	0.36

한강을 기준으로 서울외곽순환고속도로 남부구간과 북부구간에 대한 평균 V/C는 남부구간은 첨두시 0.7, 비첨두시 0.5로 산정되었으며, 북부구간은 첨두시 0.56, 비첨두시 0.36으로 분석되었다. 평균 V/C 산정결과를 살펴보면 서울외곽순환고속도로 남부구간이 북부구간보다 더 혼잡한 것으로 나타나 상식에 부합하는 것으로 나타났다. 평균 V/C를 바탕으로 하여 현재의 교통량수준에 따른 개인평균비용과 사회한계비용을 산정한다.

제3절 통행비용 추정 결과

서울외곽순환고속도로를 남부와 북부구간으로 구분하고 첨두/비첨두에 따라서 통행비용을 산정하였다. 개인의 평균비용 및 사회 한계비용에서 통행시간 신뢰성 비용의 비율 등을 살펴보았다. 통행 비용 산정은 승용차로만 구성된 교통류를 가정하여 분석하였다.

1. 남부구간

남부구간의 첨두시간대 통행비용 분석결과 개인평균비용은 351.48원/km로 추정되었고, 사회한계비용은 569.14원/km로 나타났다. 비첨두시간대 통행비용 분석결과 개인평균비용은 332.62원/km로 추정되었고, 사회한계비용은 405.15원/km로 나타났다.

<표 6-11> 통행비용 산정 결과: 남부구간

구분	통행비용	
	첨두	비첨두
용량(PCU/시)	15,896	15,896
교통량(PCU/시)	11,127	7,948
v/c	0.70	0.50
기준속도 통행시간(분/km)	0.61	0.61
통행속도(km/h)	74.86	83.45
평균통행시간(분/km)	0.80	0.72

	비용(원/대-km)	비율(%)	비용(원/대-km)	비율(%)
개인 평균비용(A)	351.48	100.0	332.62	100.0
평균 통행시간 비용	203.76	58.0	181.88	54.7
평균 신뢰성 비용	36.52	10.4	28.11	8.5
평균 운행비용	68.90	19.6	76.15	22.9
평균 유류세	42.30	12.0	46.49	14.0
사회 한계비용(B)	569.14	100.0	405.15	100.0
한계 통행시간 비용	374.17	65.7	257.68	63.6
한계 신뢰성 비용	95.02	16.7	56.37	13.9
한계 운행비용	68.49	12.0	62.19	15.3
한계 대기오염 비용	14.40	2.5	11.85	2.9
사고, 소음	17.06	3.0	17.06	4.2

2. 북부구간

서울외곽순환고속도로의 북부구간 첨두시 평균 V/C는 0.56, 비첨두시 평균 V/C는 0.36으로 집계되었으며 이에 따라서 개인 평균비용(A), 사회 한계비용(B)을 산정하였다.

북부구간의 첨두시간대 통행비용 분석결과 개인평균비용은 337.01원/km로 추정되었고, 사회한계비용은 444.59원/km로 나타났다. 비첨두시간대 통행비용 분석결과 개인평균비용은 325.62원/km로 추정되었고, 사회 한계비용은 341.59원/km로 나타났다.

개별 통행비용항목으로 살펴보면, 개인평균비용에서는 통행시간 비용과 운행비용이, 사회 한계비용에서는 통행시간 비용과 통행시간 신뢰성 비용이 가장 높은 비율을 차지한다.

<표 6-12> 통행비용 산정 결과: 북부구간

구분	통행비용	
	첨두	비첨두
용량(PCU/시)	15,896	15,896
교통량(PCU/시)	8,902	5,723
v/c	0.56	0.36
기준속도 통행시간(분/km)	0.61	0.61
통행속도(km/h)	80.89	89.17
평균통행시간(분/km)	0.74	0.67

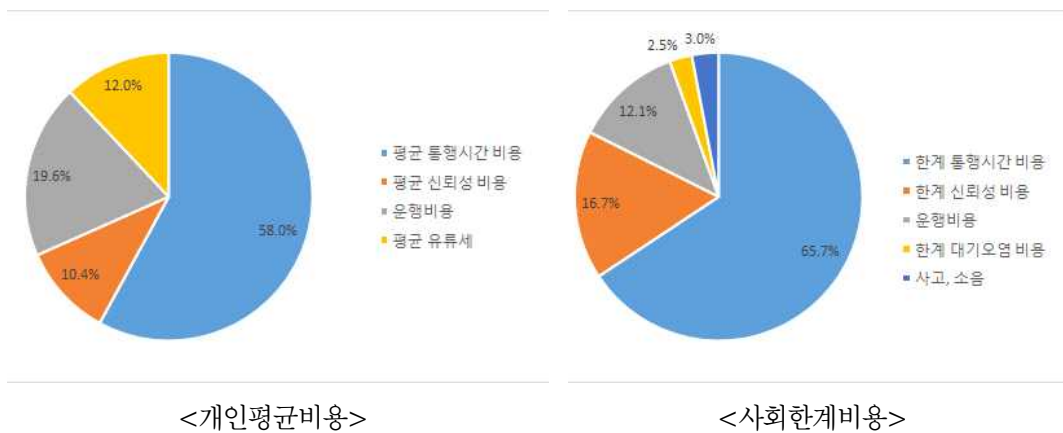
	비용(원/대-km)	비율(%)	비용(원/대-km)	비율(%)
개인 평균비용(A)	337.01	100.0	325.62	100.0
평균 통행시간 비용	187.63	55.7	171.15	52.6
평균 신뢰성 비용	30.33	9.0	23.91	7.3
평균 운행비용	73.89	21.9	81.14	24.9
평균 유류세	45.16	13.4	49.42	15.2
사회 한계비용(B)	444.59	100.0	341.59	100.0
한계 통행시간 비용	286.50	64.4	207.29	60.7
한계 신뢰성 비용	66.47	15.0	37.85	11.1
한계 운행비용	62.27	14.0	68.04	19.9
한계 대기오염 비용	12.29	2.8	11.35	3.3
사고, 소음	17.06	3.8	17.06	5.0

제4절 통행시간 신뢰성 비용 추정 결과 검토

1. 통행시간 신뢰성 비용 비율

본 연구에서는 그 동안 연구에서 반영하지 못한 통행시간 신뢰성 비용을 개인평균비용 및 사회한계비용에 포함하였다. 또한 통행시간 신뢰성 비용의 비율은 개인평균비용 및 사회한계비용에서 어느 정도의 비율을 보여주는지 살펴보았다.

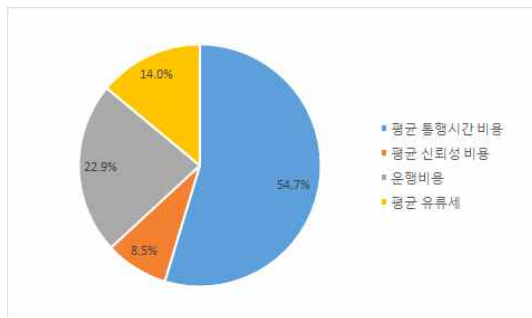
서울외곽순환고속도로 남부구간 첨두시간을 기준으로 살펴보면 개인평균비용에서 가장 큰 항목을 차지하는 비용은 통행시간비용이며 58.0%를 차지하며, 신뢰성 비용은 10.4%를 차지하는 것으로 나타났다. 사회한계비용 항목에서 통행시간 비용은 65.7%, 신뢰성 비용은 16.7%를 차지하는 것으로 나타났으며, 개인평균비용보다 사회한계비용적 측면에서 더 높은 비율을 차지하는 것으로 나타났다.



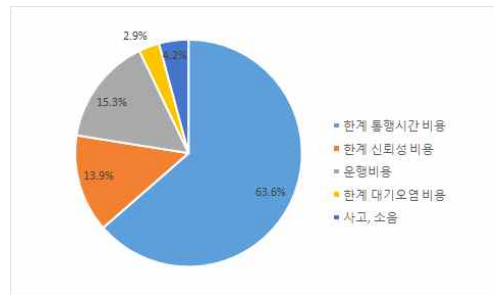
<그림 6-3> 개인평균비용과 사회한계비용의 비용별 구성비율: 남부-첨두

그리고 남부구간-비첨두, 북부구간에 대해서 개인평균비용과 사회한계비용의 구성비율을 살펴보면, 구간이 혼잡할수록 통행시간비용과 통행시간

신뢰성비용은 증가하는 추세를 보여준다. 가장 덜 혼잡한 상황인 북부구간의 비첨두 시간대는($v/c=0.36$) 사회한계비용 항목에서 통행시간 비용은 60.7%, 신뢰성 비용은 11.1%를 차지하는 것으로 나타났다.

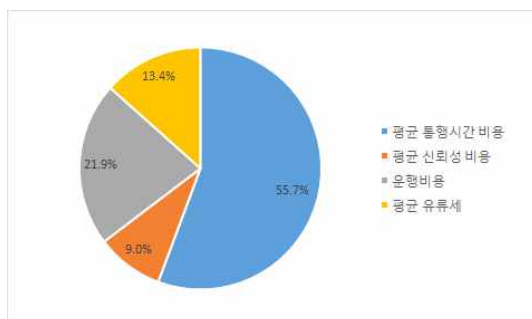


<개인평균비용>

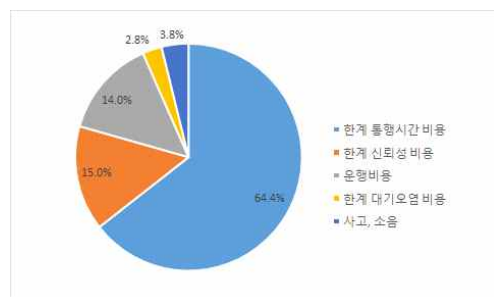


<사회한계비용>

<그림 6-4> 개인평균비용과 사회한계비용의 비용별 구성비율: 남부-비첨두

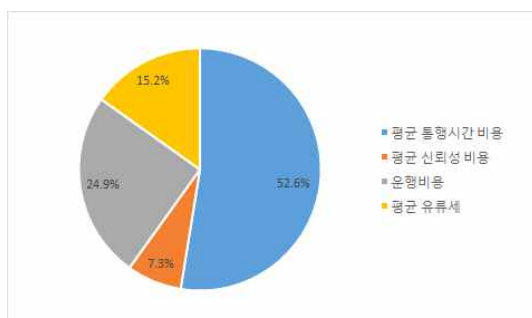


<개인평균비용>

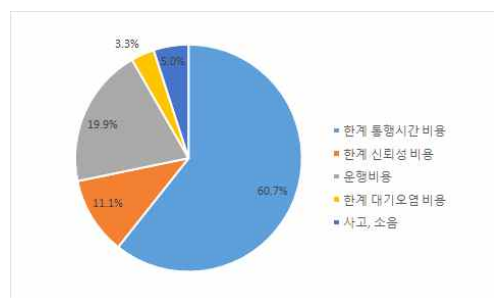


<사회한계비용>

<그림 6-5> 개인평균비용과 사회한계비용의 비용별 구성비율: 북부-첨두



<개인평균비용>



<사회한계비용>

<그림 6-6> 개인평균비용과 사회한계비용의 비용별 구성비율: 북부-비첨두

2. 다차종 반영

1) 분석개요

본 연구에서는 승용차로만 구성된 교통류를 가정하여 통행비용을 추정하였다. 그러나 실제 도로위에는 다양한 차종이 운행 중이며, 분석가능한 범위 내에서 다양한 차종을 반영하여 분석을 실시하였다. 반영이 가능한 차종은 버스와 트럭(대, 중, 소)으로, 차종별 비율을 반영하면 변화되는 내역은 다음 <표 6-13>과 같다.

통행시간 비용은 트럭과 버스의 시간가치를 반영하며, 차량운행 비용과 유류세, 대기오염 비용은 트럭 및 버스의 속도별 비용 원단위를 반영한다. 통행시간 신뢰성 비용은 통행시간 가치가 변함에 따라서 새로 산정된다.

<표 6-13> 다차종 반영을 위한 비용변화 검토

비용	개인 비용	사회적 비용	다차종 반영 변화 값
통행시간 비용	○	○	시간가치
차량운행 비용	○	○	운행비용 원단위
유류세	○	X	유류비용 원단위
대기오염 비용	X	○	대기오염비용 원단위
사고 비용	X	○	동일
도로소음 비용	X	○	동일
통행시간 신뢰성 비용	○	○	통행시간 신뢰성 가치

분석 대상 도로구간의 차종비율을 집계하여 비용산정식을 수정하였으며, View-1.0자료를 이용하여 집계한 차종비율은 다음 <표 6-14>와 같다.

<표 6-14> 구간별 차종비율

구분	차종 비율(%)	
	외곽순환-남부	외곽순환-북부
승용차	76.5	72.7
버스	1.4	1.3
트럭	22.2	25.9

2) 남부구간: 다차종

서울외곽순환고속도로의 남부구간은 첨두시 평균 V/C는 0.70, 비첨두시 평균 V/C는 0.50으로 집계되었으며 이에 따라서 개인 평균비용(A), 사회 한계비용(B)을 산정하였다.

남부구간의 첨두시간대 통행비용 분석결과 개인평균비용은 419.36원/km로 추정되었고, 사회한계비용은 653.88원/km로 나타났다. 비첨두시간대 통행비용 분석결과 개인평균비용은 396.74원/km로 추정되었고, 사회한계비용은 475.36원/km로 나타났다.

개인 평균비용 및 사회 한계비용 항목에서 가장 높은 비율을 차지하는 비용은 통행시간 비용이며 약 53.3%, 62.8%를 차지한다.

<표 6-15> 통행비용 산정 결과: 남부구간(다차종)

구분	통행비용	
	첨두	비첨두
용량(PCU/시)	15,896	15,896
교통량(PCU/시)	11,127	7,948
v/c	0.70	0.50
기준속도 통행시간(분/km)	0.61	0.61
통행속도(km/h)	74.86	83.45
평균통행시간(분/km)	0.80	0.72

	비용(원/대-km)	비율(%)	비용(원/대-km)	비율(%)
개인 평균비용(A)	419.36	100.0	396.74	100.0
평균 통행시간 비용	223.51	53.3	199.50	50.3
평균 신뢰성 비용	40.06	9.6	30.83	7.8
한계 운행비용	91.92	21.9	98.75	24.9
평균 유류세	63.87	15.2	67.66	17.1
사회 한계비용(B)	653.88	100.0	475.36	100.0
한계 통행시간 비용	410.43	62.8	282.65	59.5
한계 신뢰성 비용	104.23	15.9	61.83	13.0
한계 운행비용	93.47	14.3	89.71	18.9
한계 대기오염 비용	28.69	4.4	24.11	5.1
사고, 소음	17.06	2.6	17.06	3.6

3) 북부구간: 다차종

북부구간의 첨두시간대 통행비용 분석결과 개인평균비용은 408.75원/km로 추정되었고, 사회한계비용은 523.08원/km로 나타났다. 비첨두시간대 통행비용 분석결과 개인평균비용은 392.30원/km로 추정되었고, 사회한계비용은 410.5원/km로 나타났다.

승용차로만 구성된 교통류를 가정한 분석과 비교하여 보면 다차종을 고려한 분석을 통해서 산정된 통행비용이 높은 것을 알 수 있다. 이는 승용차보다 버스 및 화물차의 운행비용 원단위, 대기오염비용 원단위, 시간가치등이 높기 때문으로 파악된다. 개별 통행비용을 살펴보면 다차종을 고려한 분석에서 가장 높게 변화하는 비용은 한계 대기오염비용으로 나타났다.

<표 6-16> 통행비용 산정 결과: 북부구간(다차종)

구분	통행비용	
	첨두	비첨두
용량(PCU/시)	15,896	15,896
교통량(PCU/시)	8,902	5,723
v/c	0.56	0.36
기준속도 통행시간(분/km)	0.61	0.61
통행속도(km/h)	80.89	89.17
평균통행시간(분/km)	0.74	0.67

	비용(원/대-km)	비율(%)	비용(원/대-km)	비율(%)
개인 평균비용(A)	408.75	100.0	392.30	100.0
평균 통행시간 비용	206.09	50.4	188.00	47.9
평균 신뢰성 비용	33.32	8.2	26.26	6.7
평균 운행비용	99.85	24.4	105.65	26.9
평균 유류세	69.49	17.0	72.39	18.5
사회 한계비용(B)	523.08	100.0	410.5	100.0
한계 통행시간 비용	314.69	60.2	227.69	55.5
한계 신뢰성 비용	73.01	14.0	41.58	10.1
한계 운행비용	91.30	17.5	99.15	24.2
한계 대기오염 비용	27.02	5.2	25.02	6.1
사고, 소음	17.06	3.3	17.06	4.2

제7장 결론

제1절 연구결과 요약

1. 통행시간 신뢰성 지표 산정 모형

본 연구에서는 통행시간 신뢰성 지표 산정을 위해서 선행연구를 고찰하고, 통행시간 신뢰성 지표로 표준편차를 산정하는 모형을 구축하였다. MD(Mean Delay)와 링크길이, 중차량 비율을 독립변수로 하여 (식 7-1)과 같이 2차함수형태의 통행시간 신뢰성 지표 산정모형을 제시하였다. 다양한 통행시간 신뢰성 추정 모형을 검토하였으며, MD(Mean Delay)와 링크길이, 중차량비율을 독립변수로 하는 2차함수 형태의 모형을 개발하였다. 그리고 차로수에 따라서 개별적으로 모형을 구축하였다. 적합한 통행시간 신뢰성 지표 추정모형 구축을 위하여 View-T 1.0의 개별통행행태자료를 이용하였으며, 우리나라 대표고속도로 구간 8개를 대상으로 하여 분석을 실시하였다.

$$\sigma = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \delta L + \eta L^2 + \zeta HR \quad (7-1)$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이

HR : 중차량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \zeta$: 파라미터

2차함수 형태의 통행시간 신뢰성 추정 모형을 구축한 후 차로수에 따라서 개별 파라미터에 대한 추정을 실시한 결과는 다음 <표 7-1>과 같다. 차로수를 통행시간 신뢰성 지표 산정모형의 독립변수로 이용하는 것은 의미 있지만 어떠한 형태로 반영하는지가 관건이었다. Chow test 검토결과 단방향 차로수 2차로, 3차로, 4차로 이상으로 구분하여 각각 모형을 구축하는 것이 적합한 것으로 판단하였다. 이는 차로수에 따라서 도로가 각기 다른 특성을 가지고 있기 때문으로 판단되며, 2차로 도로는 거의 지방부에 위치하고, 4차로 도로는 도시부에 위치하고 있기 때문으로 판단한다.

개별 파라미터 추정 값에 대하여 살펴보면 상수값은 2차로, 3차로, 4차로 모두 음수로 도출되었으며, 평균지체(MD)에 대한 파라미터 값은 3차로 도로가 가장 높게 추정되었고 이는 3차로 도로의 통행시간 표준편차 값이 가장 크기 때문으로 판단된다. 그리고 링크길이에 대한 파라미터를 살펴보면 4차로 이상의 도로가 가장 낮게 추정되었고, 이는 4차로 이상의 도로는 비교적 링크길이가 짧기 때문에 그 영향력이 낮은 것으로 보인다.

<표 7-1> 통행시간 신뢰성 모형 계수 최종 분석결과 및 결정계수

구분	2차로		3차로		4차로 이상	
	추정값	유의확률	추정값	유의확률	추정값	유의확률
α	-0.043	0.000	-0.083	0.000	-0.043	0.000
β	0.439	0.000	0.480	0.000	0.421	0.000
γ	-0.069	0.000	-0.100	0.000	-0.021	0.000
δ	0.145	0.000	0.135	0.000	0.109	0.000
η	0.001	0.000	0.004	0.000	0.001	0.000
ζ	0.131	0.000	0.256	0.000	0.167	0.000
R^2	0.884		0.923		0.903	

2. 통행시간 신뢰성 비용

통행시간 신뢰성 지표 추정모형을 구축하고 이를 바탕으로 통행시간 신뢰성 비용을 산정하였다. 통행시간 신뢰성 가치는 신뢰성 비율(Reliability Ratio)을 이용하여 산정하였으며, 국토해양부(2009)에서 제시한 0.8을 이용하였다.

통행시간 신뢰성 비용추정결과 개인평균비용 대비 통행시간 신뢰성 비용은 7.3~10.4%를 차지하는 것으로 나타났다. 도로가 혼잡할수록(V/C가 높을수록) 개인평균비용에서 차지하는 비율은 상승하는 것으로 분석되었다. 사회한계비용 대비 통행시간 신뢰성 비용은 10.7~16.7%를 차지하는 것으로 나타났으며, 이 또한 도로가 혼잡할수록 비율은 상승하는 것으로 분석되었다. 도로가 혼잡할수록 통행시간 비용과 통행시간 신뢰성 비용은 다른 비용보다 더 높게 상승하며, 통행시간 신뢰성 비용은 사회적 관점에서 살펴보면 개인이 지불하는 비용보다 더 많은 비용을 지불하고 있는 것으로 보인다.

<표 7-2> 유료도로 적정 통행료 분석결과

단위: 원/km

구분		남부구간		북부구간	
		첨두	비첨두	첨두	비첨두
개인 평균 비용	평균 통행시간 비용	203.76	181.88	187.63	171.15
	평균 신뢰성 비용	36.52	28.11	30.33	23.91
	평균 운행비용	68.90	76.15	73.89	81.14
	평균 유류세	42.30	46.49	45.16	49.42
	합계	351.48	332.62	337.01	325.62
사회 한계 비용	한계 통행시간 비용	374.17	257.68	286.50	207.29
	한계 신뢰성 비용	95.02	56.37	66.47	37.85
	한계 운행비용	68.49	62.19	62.27	68.04
	한계 대기오염 비용	14.40	11.85	12.29	11.35
	사고, 소음	17.06	17.06	17.06	17.06
	합계	569.14	405.15	444.59	341.59

제2절 연구의 한계 및 향후 연구방향

1. 연구의 한계

1) 분석 자료

본 연구에서는 링크기반자료를 이용하여 통행시간 신뢰성 지표 산정모형을 개발하였다. 통행시간 표준편차를 산정하기 위해서는 개별 차량들의 통행속도 자료가 존재하는 비 집계자료가 필요하므로 View-T 1.0의 속도 프로파일 자료를 이용하였다. View-T 1.0의 속도 프로파일 자료는 링크를 단위로 하여 구축된 자료이므로, 본 연구에서도 링크 기반으로 통행시간 표준편차 및 이를 추정하는 모형을 개발하였다.

Black(2004)의 연구에서도 링크 기반 자료를 이용하여 통행시간 신뢰성 지표 추정모형을 구축하였으며, Hyder consulting(2008)에서도 링크 기반 분석은 모형의 활용범위가 넓다고 제시하였다. 하지만 통행시간 신뢰성의 개념적인 측면에서는 출발지부터 도착지까지 경로 통행시간에 대한 변동을 살펴보는 것이 더 정확한 것으로 보인다. Kouwenhoven(2016)의 연구에서도 경로 통행시간 자료를 이용하여 통행시간 신뢰성 지표 산정모형을 구축하였다. 하지만 경로 통행시간 및 속도가 개별 차량단위로 구축된 대규모 자료는 현재 구축되어 있지 않기 때문에 경로기반분석은 상당한 어려움이 존재하는 것으로 판단된다. 물론 일부 구간에 대하여 경로기반 데이터셋을 구축하여 통행시간 신뢰성 지표 모형을 구축할 수 있겠으나, 해당 경로가 가진 특성이 모형에 강하게 반영될 것이다. 이러한 단점을 극복하기 위해서는 다양한 경로구간에 대한 개별차량 자료가 필요한 것이다.

2) 일반도로

그리고 본 연구에서는 고속도로에 한정하여 통행시간 신뢰성 지표 모형을 추정하였다. View-T 1.0의 속도 프로파일 자료에서는 일반도로에

대한 자료도 구축되어 있어서 분석이 가능하지만 일반도로를 링크기반으로 분석하는 것은 다소 무리가 있다. 이는 신호교차로가 존재하기 때문에 링크 기반 분석에서는 신호교차로의 영향을 정확하게 파악할 수 없다. 본 연구에서도 고속도로에 대하여 분석한 이유는 연속류이기 때문에 링크기반분석을 하여도 신호교차로의 영향을 받지 않기 때문이다. 물론 향후 경로기반 개별차량자료가 구축이 되면 일반도로에 대한 통행시간 신뢰성 지표 산정 모형 구축이 가능할 것이다.

3) 통행시간 신뢰성 가치

본 연구에서는 통행시간 신뢰성 가치를 별도로 추정하지 않았다. 기존의 연구결과에서 통행시간 신뢰성 비율을 인용하여 통행시간가치에 곱하여 통행시간 신뢰성 가치를 추정하였다. 일반적으로 통행시간 신뢰성 가치는 도로 이용자들을 대상으로 잠재선호 설문조사를 실시하여 기초자료를 구축한다. 그리고 이 구축된 자료를 이용하여 수단·경로선택 모형을 구축하여 통행시간 신뢰성 비율을 추정한다. 본 연구에서는 여러 가지 제약사항이 있어 직접 설문조사를 실시하지 않고, 과거의 선행연구를 참고로 하여 통행시간 신뢰성 가치를 산정하였지만, 현재의 상황을 반영한 새로운 통행시간 신뢰성 가치를 추정할 필요가 있다.

4) 통행시간 신뢰성 지표 및 설명변수

본 연구에서는 통행시간 신뢰성 지표로 표준편차를 이용하였고 이에 대한 설명변수로 평균지체와 링크길이, 중차량 비율, 차로수를 선정하였다. 기존의 연구에서는 평균지체와 링크길이만으로 표준편차를 설명하고 있으나, 본 연구에서는 중차량 비율과 차로수라는 새로운 독립변수를 적용하였다. 하지만 통행시간 신뢰성 지표에 영향을 주는 새로운 독립변수를 고민해보아야 할 것이다. 미국의 SHRP2(2013)에서는 통행시간 신뢰성 지표 모형에 기상상태를 독립변수로 적용한 것도 있다. 물론 기상상

태와 개별차량자료간의 연결된 자료를 구하기 쉽지 않아서 우리나라에서는 당장 반영하기 쉽지 않을 것이다. 그리고 본 연구에서는 통행시간 표준편차를 통행시간 신뢰성 지표로 하였다. 물론 최근의 연구 경향 및 추정 용이성, 설명의 직관성 등의 장점이 있지만 방대한 자료가 구축되고 있으므로, 다양한 통행시간 신뢰성 지표에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

2. 향후 연구방향

1) 경로기반 자료

향후 경로기반 자료가 구축되면, 경로기반 자료를 이용하여 통행시간 신뢰성 지표 추정모형을 구축할 수 있을 것이다. 링크기반 분석결과와 비교도 가능하고 고속도로 및 일반도로를 대상으로 통행시간 신뢰성 추정모형도 구축이 가능할 것이다. 본 연구에서 분석한 결과 링크의 차로 수, 중차량 비율, 개별 도로구간에 대해서 통행시간 신뢰성이 차이가 적지 않은 만큼 경로기반 자료를 다양한 구간에 대해서 구축이 되어야 할 것이다. 그리고 전체 도로를 보았을 때 고속도로 보다는 일반도로의 비중이 더 크며, 이용자들도 훨씬 많을 것으로 판단된다. 경로기반 개별통행 자료가 구축되면 일반도로에 대한 통행시간 신뢰성 지표 산정 연구가 이루어 질 수 있을 것으로 보인다.

2) 승용차외에 다른 수단

본 연구에서는 고속도로를 대상으로 통행시간 신뢰성 추정 모형을 개발하였지만, 도시부 통행의 65%¹⁵⁾를 담당하고 있는 대중교통 수단에 대한 통행시간 신뢰성 추정 모형을 필요할 것으로 보인다. 장수은(2008)의 연구에서는 도시부 및 지역간 철도의 통행시간 신뢰성 지표 산정모형을

15) 2017년 서울시 수단분담률(대중교통: 65%, 승용차: 24.4%, 택시: 6.5%, 기타4.15),
자료: <http://news.seoul.go.kr/traffic/archives/285>

개발하였지만, 그 뒤로 후속 연구는 나오고 있지 않다. 대중교통은 스케줄이 있기 때문에 분석이 까다로울 것으로 보이지만, 최근에 대중교통 통행자료(스마트 카드 자료, 개별 차량(버스 및 지하철) 출도착 자료 등)도 방대하게 구축된 만큼 대중교통에 대해서 통행시간 신뢰성 지표 모형을 만드는 연구도 필요할 것이다.

3) Schedule-Delay 모형

de Jong(2015)의 연구에서는 통행시간 신뢰성 지표 산정 모형은 Schedule-Delay 모형을 중심으로 연구되어야 한다고 주장하고 있다. 하지만 현재는 분석자료가 부족하기 때문에 Schedule-Delay 모형에 대한 연구가 활발하지 않다. Schedule-Delay 모형을 구축하려면 개별 통행자의 선호 도착시간을 파악하고, 그 시간보다 늦게 도착했는지, 일찍 도착했는지를 파악하여 데이터로 구축되어 있어야 한다. Schedule-Delay 모형은 일찍 도착한 경우와 늦게 도착한 경우에 대한 가중치를 달리하여 통행시간 신뢰성을 설명한다. 통행자의 행태를 반영하여 통행시간 신뢰성을 가장 잘 설명할 수 있는 모형으로 알려진 Schedule-Delay 모형에 대한 연구도 지속적으로 필요할 것으로 보인다.

참고문헌

[국내연구]

교통경제학(2013), 이번송, 손의영, 홍성효, 박영사.

국토교통부(2017), 교통시설 투자평가 지침 제6차 개정.

국토해양부(2009), 교통시설 투자평가 지침 제3차 개정.

국토해양부(2013), 도로용량편람.

경기개발연구원(2018), 경기도 민자도로 통행료의 합리적 개선방안 연구.

남대식(2009), DSRC 검지체계에 기반한 연속류 구간속도 모니터링 알고리즘 개발. 서울대학교 석사학위 논문.

장수은, 강지혜, 이승준(2008), 통행시간 신뢰성 지표 개발 및 산정에 관한 연구, 대학교통학회지, 26(5), 217-226.

장수은, 강지혜(2008), 통행시간 신뢰성 가치 산정에 관한 연구, 대한교통학회지, 26(6), 133-142.

최영은(2017), 유료도로 선택행태를 이용한 통행시간 신뢰성의 가치 추정, 서울대학교 박사학위 논문.

한국개발연구원(2018), 국가교통DB검토 및 교통부문 쟁점 연구

한국개발연구원(2017), 도로·철도 부문 사업의 예비타당성조사 표준지침 수정·보완 연구(제6판).

한국개발연구원(2013), 예비타당성조사 수행을 위한 통행시간가치 산정에 관한 연구.

한국개발연구원(2008), 고속도로 통행요금 제도 및 법령에 관한 개선방안 연구.

한국교통연구원(2018), 교통수요 분석 배포 설명자료.

한국교통연구원(2016), 고속도로사업 타당성분석 현실화를 위한 편익 및 유지관리비 산정개선연구.

한국도로공사(2013), 고속도로 통행시간가치 분석 및 효과평가 연구.

[국외연구]

Al-Kaisy, A., Hall, F., Reisman, E, S(2002), Developing passenger car equivalents for heavy vehicles on freeways during queue discharge flow, Transportation Research Part A, 36, 725-742.

Arup(2004), Introducing reliability into travel demand models, Association for european transport.

Australian Transport Council(2006), National guidelines for transport system management in Australia.

Black, I., Bates, J., Fearon, J., Gilliam, C., Kerr, A(2004), Research programme measures the variability of urban journey times, Traffic Engineering and Control, 409-415.

Chow, G, C(1960), Test of equality between sets of coefficients in two linear regressions, Econometrica, 28, 591-605.

Copley, G., Murphy, P., Pearce, D(2002), Understanding and valuing journey time variability, European Transport Conference.

- de Jong, G., Bliemer, M(2015), On including travel time reliability of road traffic in appraisal, Transportation Research Part A, 73, 80-95.
- Demarchi, S, H., Setti, J, R(2003), Limitations of passenger-car equivalent derivation for traffic streams with more than one truck type, Transportation Research Record, 1852, 96-104.
- DfT(2014), Transport Analysis Guidance.
- Eliasson, J(2004), Car drivers' valuations of travel time variability, unexpected delays and queue driving, European Transport Conference.
- Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure(2016), Methodology Manual for the Federal Transport Infrastructure Plan 2030.
- Fowkes, T(2007), The design and interpretation of freight stated preference experiments seeking to elicit behavioural valuations of journey attributes, Transportation research Part B, 41, 966 - 980.
- Geistefeldt, J., Hohmann, S., Wu, N(2014), Ermittlung des Zusammenhangs von Infrastruktur und Zuverlässigkeit des Verkehrsablaufs für den Verkehrsträger Straße, Final report for Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure.
- Halse, A., Samstad, H., Killi, M., Flugel, S., Ramjerdi, F(2010), Valuation of freight transport time and reliability(in Norwegian), TØI Report 1083/2010.
- Hirschman, I., McNight, C., Pucher, J., Paaswell, R.E., Berechman, J

- (1995) Bridge and tunnel toll elasticities in New York: some recent evidence, *Transportation*, 22, 97–113.
- Hensher, D(2007), Valuation of travel time savings. In: de Palma, Andre, Lindsey, Robin, Quinet, Emile, Vickerman, Handbook in Transport Economics.
- Hyder consulting(2008), Forecasting travel time variability in urban area, DfT draft report.
- Hellinga, B(2011), Defining, Measuring, and modelling transportation network reliability. Final Report, Delft University of Technology.
- Krammes, R, A., Crowley, K, W(1986), Passenger car equivalents for trucks on level freeway segments, *Transportation Research Record*, 1091, 10–17.
- Kouwenhoven, M., de Jong, G., Koster, P., van den Berg, V., Verhoef, E., Bates, J., Warffemius, P(2014), New values of time and reliability in passenger transport in The Netherlands. *Research in Transportation Economics*, 47, 37 - 49.
- Kouwenhoven, M., Warffemius, P(2016), Forecasting travel time reliability in road transport : A new model for the Netherlands, ITE discussuon paper.
- Mahmassani, H(2011), Incorporating reliability performance measures in planning and operations modelling tools, SHRP2 L04 Report.
- MacDonald, M(2009), Development of INCA to incorporate single carriageways and managed motorways, DfT Summary Report.

- MVA(1996), Benefits of reduced travel time variability, DfT Report.
- Peer, S., Koopmans, C., Verhoef, E(2012), Prediction of travel time variability for cost - benefit analysis, Transportation research Part A, 46, 79 - 90.
- Rakha, H., Ingle, A., Hancock, K., Al-Kaisy, A(2007), Estimating truck equivalencies for freeway sections, Transportation Research Record, 2027, 73-84.
- Significance et al(2013), Values of time and teliability in passenger and freight transport in the netherlands. Report for the Ministry of Infrastructure and the Environment.
- Shankar, V., Mannering, F(1998), Modeling the endogeneity of lane-means and lane-speed deviations: a structural equations approach, Transportation research Part A, 32, 311 - 322.
- Transportation Research Board(2013), Analytical Procedures for Determining the Impacts of Reliability Mitigation Strategies, SHRP2 Report S2-L03-RR-1.
- Transport Research Center of Dutch Ministry of Transport(2005), The value of reliability in transport-provisional values for the Netherlands based on expert opinion.
- van Lint, J., Henk J., van Zuylen., Tu, H(2008), Travel time unreliability on freeways: Why measures based on variance tell only half the story, Transportation Research Part A, 42, 258-277.
- Walters, A(1961), The theory and measurement of private and social cost of highway congestion, Econometrica, 29(4), 676 - 699.

Webster, N., Elefteriadou, L(1999), A Simulation study of truck Passenger car equivalents (PCE) on basic freeway sections, Transportation Research Part B, 33, 323-336.

Yang, X., Zhang, N(2009), Effects of the number of lanes on traffic characteristics: a simulation study, 2nd international conference on transportation engineering, 1945-1950.

Yang, X., Zhang, N(2007), Effects of the Number of Lanes on Highway Capacity, 14th international conference on management science and engineering, 351-356.

[홈 페이지]

고속도로 공공데이터 포털: <http://data.ex.co.kr/>

뷰티(View-T) 1.0: viewt.ktdb.go.kr/

서울고속도로 주식회사: <https://www.seoulbeltway.co.kr>

서울시 교통: <http://news.seoul.go.kr/traffic/archives/285>

한국도로공사: <http://www.ex.co.kr/>

한국석유공사 기름 값 정보: <http://www.opinet.co.kr>

한국은행 경제통계시스템: <https://ecos.bok.or.kr/>

부록

1. 고속도로 별 통행관련 기초자료 분석¹⁶⁾

1) 경부고속도로

<표 부록-1> 경부고속도로 기초자료 분석결과

시간대	통행시간 표준편차	MD	평균 통행속도 (km/h)	V/C	중차량비율 (%)
0~1시	0.19	0.00	97.23	0.11	29.73
1~2시	0.20	0.01	96.18	0.08	29.75
2~3시	0.21	0.03	94.17	0.06	29.74
3~4시	0.21	0.05	92.62	0.06	29.71
4~5시	0.20	0.05	92.32	0.08	29.66
5~6시	0.20	0.02	94.75	0.14	29.86
6~7시	0.20	0.02	94.17	0.26	30.26
7~8시	0.19	0.02	93.24	0.35	30.30
8~9시	0.20	0.02	93.60	0.37	30.15
9~10시	0.20	0.03	91.96	0.39	30.05
10~11시	0.20	0.06	89.97	0.42	29.97
11~12시	0.21	0.06	89.69	0.42	29.93
12~13시	0.20	0.04	90.98	0.39	29.90
13~14시	0.20	0.05	90.64	0.40	29.96
14~15시	0.21	0.06	89.52	0.42	29.95
15~16시	0.21	0.06	89.43	0.43	29.94
16~17시	0.21	0.06	89.44	0.44	29.90
17~18시	0.20	0.06	89.12	0.44	29.95
18~19시	0.20	0.06	89.07	0.41	29.90
19~20시	0.20	0.05	89.91	0.35	29.85
20~21시	0.19	0.04	90.43	0.30	29.76
21~22시	0.19	0.03	92.19	0.27	29.75
22~23시	0.19	0.02	93.13	0.22	29.69
23~24시	0.19	0.00	95.67	0.17	29.69

¹⁶⁾ 신뢰성 기준속도로 이상치 제거하지 않은 원시자료

2) 경인고속도로

<표 부록-2> 경인고속도로 기초자료 분석결과

시간대	통행시간 표준편차	MD	평균 통행속도 (km/h)	V/C	중차량비율 (%)
0~1시	0.13	0.00	0.23	97.67	21.76
1~2시	0.13	0.00	0.15	99.16	22.46
2~3시	0.14	0.00	0.11	98.80	22.99
3~4시	0.14	0.00	0.10	97.63	23.31
4~5시	0.15	0.01	0.12	96.47	22.85
5~6시	0.12	0.02	0.29	95.49	21.73
6~7시	0.14	0.09	0.51	87.80	20.79
7~8시	0.17	0.20	0.64	79.87	20.55
8~9시	0.20	0.21	0.59	77.80	20.52
9~10시	0.17	0.18	0.58	80.81	20.62
10~11시	0.17	0.18	0.58	80.43	20.63
11~12시	0.16	0.15	0.56	82.14	20.58
12~13시	0.13	0.11	0.53	85.35	20.67
13~14시	0.13	0.13	0.56	83.25	20.72
14~15시	0.15	0.17	0.59	80.29	20.67
15~16시	0.17	0.18	0.58	79.67	20.69
16~17시	0.17	0.18	0.60	79.65	20.74
17~18시	0.19	0.25	0.63	74.77	20.83
18~19시	0.22	0.31	0.62	70.39	20.67
19~20시	0.20	0.18	0.55	78.05	20.64
20~21시	0.12	0.10	0.49	85.31	20.73
21~22시	0.11	0.08	0.47	87.91	20.88
22~23시	0.12	0.05	0.39	90.86	21.02
23~24시	0.12	0.02	0.31	94.53	21.25

3) 서해안고속도로

<표 부록-3> 서해안고속도로 기초자료 분석결과

시간대	통행시간 표준편차	MD	평균 통행속도 (km/h)	V/C	중차량비율 (%)
0~1시	0.21	0.00	106.00	0.06	29.66
1~2시	0.21	0.00	104.48	0.04	29.95
2~3시	0.22	0.00	102.36	0.03	30.45
3~4시	0.22	0.00	101.21	0.04	30.41
4~5시	0.22	0.00	101.15	0.05	29.96
5~6시	0.22	0.00	103.02	0.09	29.18
6~7시	0.21	0.00	105.12	0.15	28.55
7~8시	0.21	0.00	106.29	0.20	28.14
8~9시	0.21	0.00	106.52	0.22	27.98
9~10시	0.21	0.00	104.62	0.25	27.78
10~11시	0.21	0.00	103.00	0.28	27.63
11~12시	0.21	0.00	102.76	0.28	27.63
12~13시	0.21	0.00	103.45	0.27	27.72
13~14시	0.21	0.00	103.44	0.27	27.70
14~15시	0.21	0.00	102.80	0.29	27.59
15~16시	0.21	0.00	102.73	0.30	27.53
16~17시	0.22	0.00	102.89	0.30	27.53
17~18시	0.22	0.00	102.97	0.29	27.57
18~19시	0.22	0.00	103.02	0.26	27.71
19~20시	0.22	0.00	103.34	0.21	27.96
20~21시	0.21	0.00	103.01	0.18	28.20
21~22시	0.22	0.00	103.59	0.15	28.42
22~23시	0.21	0.00	104.62	0.12	28.73
23~24시	0.20	0.00	106.15	0.09	29.11

4) 영동고속도로

<표 부록-4> 영동고속도로 기초자료 분석결과

시간대	통행시간 표준편차	MD	평균 통행속도 (km/h)	V/C	중차량비율 (%)
0~1시	0.18	0.00	99.31	0.09	22.73
1~2시	0.18	0.01	97.77	0.06	22.44
2~3시	0.19	0.03	95.27	0.05	22.28
3~4시	0.19	0.04	94.06	0.05	22.26
4~5시	0.19	0.03	95.04	0.07	22.44
5~6시	0.18	0.01	96.99	0.16	23.34
6~7시	0.18	0.02	96.35	0.27	24.00
7~8시	0.18	0.03	95.39	0.33	24.27
8~9시	0.19	0.04	95.17	0.37	24.27
9~10시	0.18	0.05	93.63	0.40	24.27
10~11시	0.19	0.06	91.42	0.43	24.29
11~12시	0.19	0.06	91.51	0.43	24.22
12~13시	0.18	0.04	93.66	0.40	24.15
13~14시	0.18	0.04	94.05	0.41	24.20
14~15시	0.19	0.06	91.93	0.44	24.32
15~16시	0.20	0.07	91.16	0.45	24.34
16~17시	0.19	0.07	91.53	0.45	24.31
17~18시	0.19	0.07	91.22	0.44	24.35
18~19시	0.19	0.07	91.47	0.40	24.28
19~20시	0.18	0.05	92.78	0.34	24.10
20~21시	0.18	0.04	93.68	0.30	23.90
21~22시	0.17	0.03	95.17	0.25	23.70
22~23시	0.17	0.01	97.40	0.19	23.40
23~24시	0.16	0.00	99.33	0.14	23.04

5) 중부고속도로

<표 부록-5> 중부고속도로 기초자료 분석결과

시간대	통행시간 표준편차	MD	평균 통행속도 (km/h)	V/C	중차량비율 (%)
0~1시	0.16	0.00	101.46	0.1	29.71
1~2시	0.17	0.00	98.53	0.07	30.22
2~3시	0.17	0.03	95.12	0.06	30.48
3~4시	0.17	0.05	92.92	0.06	30.45
4~5시	0.17	0.04	93.22	0.08	30.14
5~6시	0.16	0.00	98.79	0.16	29.34
6~7시	0.14	0.00	99.29	0.29	28.57
7~8시	0.13	0.00	98.16	0.44	27.83
8~9시	0.13	0.00	98.61	0.48	27.65
9~10시	0.13	0.02	95.93	0.5	27.52
10~11시	0.15	0.04	92.61	0.54	27.37
11~12시	0.14	0.04	93.31	0.53	27.42
12~13시	0.14	0.02	95.52	0.48	27.54
13~14시	0.14	0.02	96.01	0.49	27.50
14~15시	0.15	0.04	93.71	0.52	27.43
15~16시	0.15	0.04	92.66	0.54	27.39
16~17시	0.16	0.05	91.77	0.55	27.35
17~18시	0.17	0.07	90.09	0.56	27.32
18~19시	0.18	0.07	89.31	0.51	27.48
19~20시	0.18	0.05	91.83	0.42	27.81
20~21시	0.16	0.03	94.79	0.35	28.08
21~22시	0.14	0.00	97.72	0.29	28.33
22~23시	0.14	0.00	100.86	0.22	28.72
23~24시	0.15	0.00	102.51	0.16	29.16

6) 중부내륙고속도로

<표 부록-6> 중부내륙고속도로 기초자료 분석결과

시간대	통행시간 표준편차	MD	평균 통행속도 (km/h)	V/C	중차량비율 (%)
0~1시	0.13	0.01	96.67	0.09	32.06
1~2시	0.14	0.01	95.85	0.06	32.17
2~3시	0.14	0.03	93.98	0.05	32.28
3~4시	0.14	0.03	92.68	0.05	32.26
4~5시	0.13	0.03	93.05	0.07	32.15
5~6시	0.13	0.01	96.34	0.10	32.19
6~7시	0.13	0.00	100.76	0.14	32.31
7~8시	0.12	0.00	104.71	0.18	32.47
8~9시	0.12	0.00	105.66	0.20	32.54
9~10시	0.12	0.00	104.15	0.23	32.47
10~11시	0.12	0.00	102.21	0.26	32.46
11~12시	0.12	0.00	101.39	0.27	32.44
12~13시	0.12	0.00	100.95	0.26	32.38
13~14시	0.12	0.00	100.74	0.27	32.35
14~15시	0.13	0.00	100.57	0.28	32.34
15~16시	0.13	0.00	100.85	0.29	32.40
16~17시	0.12	0.00	100.94	0.30	32.41
17~18시	0.12	0.00	100.75	0.30	32.47
18~19시	0.12	0.01	99.55	0.28	32.53
19~20시	0.11	0.01	98.59	0.25	32.35
20~21시	0.12	0.02	97.14	0.23	32.16
21~22시	0.12	0.02	97.01	0.20	32.02
22~23시	0.12	0.01	97.30	0.16	31.95
23~24시	0.12	0.01	97.65	0.12	31.96

7) 호남고속도로

<표 부록-7> 호남고속도로 기초자료 분석결과

시간대	통행시간 표준편차	MD	평균 통행속도 (km/h)	V/C	중차량비율 (%)
0~1시	0.15	0.00	99.50	0.06	29.22
1~2시	0.16	0.01	97.11	0.05	30.14
2~3시	0.17	0.04	93.90	0.04	30.72
3~4시	0.17	0.05	92.07	0.04	30.80
4~5시	0.17	0.05	92.41	0.05	30.09
5~6시	0.16	0.02	95.37	0.08	28.90
6~7시	0.15	0.00	99.86	0.14	27.49
7~8시	0.14	0.00	101.47	0.25	26.39
8~9시	0.14	0.00	101.27	0.29	26.04
9~10시	0.13	0.00	100.07	0.31	25.81
10~11시	0.14	0.00	99.02	0.34	25.61
11~12시	0.14	0.00	99.40	0.33	25.64
12~13시	0.13	0.00	100.11	0.29	25.84
13~14시	0.13	0.00	99.70	0.30	25.70
14~15시	0.14	0.00	98.77	0.32	25.56
15~16시	0.14	0.00	98.86	0.34	25.45
16~17시	0.14	0.00	99.47	0.35	25.40
17~18시	0.13	0.00	99.31	0.36	25.28
18~19시	0.13	0.00	98.84	0.33	25.46
19~20시	0.13	0.00	99.34	0.26	25.97
20~21시	0.13	0.00	99.27	0.20	26.48
21~22시	0.13	0.00	99.80	0.17	26.89
22~23시	0.14	0.00	100.13	0.13	27.47
23~24시	0.14	0.00	100.75	0.09	28.25

8) 서울외곽순환고속도로

<표 부록-8> 서울외곽순환고속도로 기초자료 분석결과

시간대	통행시간 표준편차	MD	평균 통행속도 (km/h)	V/C	중차량비율 (%)
0~1시	0.11	0.00	98.95	0.14	26.94
1~2시	0.11	0.00	98.70	0.09	28.03
2~3시	0.12	0.00	96.74	0.06	28.84
3~4시	0.12	0.02	94.75	0.06	28.69
4~5시	0.12	0.02	93.62	0.11	26.84
5~6시	0.11	0.02	94.26	0.27	24.72
6~7시	0.13	0.07	88.03	0.54	23.76
7~8시	0.15	0.16	80.82	0.66	23.60
8~9시	0.16	0.18	79.58	0.66	23.51
9~10시	0.16	0.15	80.63	0.64	23.59
10~11시	0.16	0.15	79.91	0.62	23.72
11~12시	0.15	0.13	82.23	0.59	23.86
12~13시	0.13	0.08	86.23	0.56	23.80
13~14시	0.12	0.08	86.12	0.57	23.81
14~15시	0.13	0.11	83.60	0.63	23.60
15~16시	0.14	0.13	81.89	0.65	23.51
16~17시	0.15	0.15	80.34	0.68	23.40
17~18시	0.17	0.20	76.11	0.70	23.42
18~19시	0.18	0.24	73.24	0.65	23.58
19~20시	0.18	0.18	77.04	0.57	23.88
20~21시	0.14	0.09	85.15	0.48	24.19
21~22시	0.12	0.05	89.91	0.41	24.52
22~23시	0.11	0.03	92.42	0.32	25.06
23~24시	0.11	0.01	96.31	0.22	25.85

2. 단위거리당 통행시간 표준편차

단위거리당 통행시간 표준편차를 통행시간 신뢰성 지표(모형의 종속변수가 단위거리당 통행시간 표준편차)로 하였을 때 모형구축결과를 제시한다.

1) 이차함수, 독립변수: Mean Delay

①모형 형태

$$\frac{\sigma}{L} = \alpha + \beta MD + \gamma MD^2 + \zeta HR \quad (\text{부록-1})$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이(km)

HR : 중차량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \zeta$: 파라미터

②구축결과

<표 부록-9> 단위거리당 통행시간 표준편차 모형 구축결과(2차함수, MD)

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	0.115	0.001	86.565	0.000
β	0.165	0.004	43.705	0.000
γ	-0.053	0.003	-19.036	0.000
ζ	0.126	0.004	28.497	0.000
R^2 : 0.125				

2) 파워함수, 독립변수: Mean Delay

①모형 형태

$$\frac{\sigma}{L} = \alpha MD^{\beta} HR^{\gamma} \quad (\text{부록-2})$$

여기서,

- MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간
- L : 링크길이(km)
- HR : 중차량 비율
- σ : 링크 통행시간 표준편차
- α, β, γ : 파라미터

②구축결과

<표 부록-10> 단위거리당 통행시간 표준편차 모형 구축결과(파워함수, MD)

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	0.257	0.003	82.903	0.000
β	0.064	0.001	64.646	0.000
γ	0.173	0.007	24.679	0.000

R^2 : 0.115

3) 로그선형함수, 독립변수: Mean Delay

①모형 형태

$$\frac{\sigma}{L} = \alpha + \beta \text{LOG}(MD) + \gamma \text{LOG}(HR) \quad (\text{부록-3})$$

여기서,

MD : 평균속도 통행시간-기준속도 통행시간

L : 링크길이(km)

HR : 중차량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

α, β, γ : 파라미터

②구축결과

<표 부록-11> 단위거리당 통행시간 표준편차 모형 구축결과(로그함수, MD)

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	-0.634	0.004	-148.102	0.000
β	0.059	0.001	47.718	0.000
γ	0.150	0.006	25.142	0.000

R^2 : 0.105

4) 이차함수, 독립변수: Congestion Index

①모형 형태

$$\frac{\sigma}{L} = \alpha + \beta CI + \gamma CI^2 + \zeta HR \quad (\text{부록-4})$$

여기서,

CI : 평균속도 통행시간/기준속도 통행시간

L : 링크길이(km)

HR : 중차량 비율

σ : 링크 통행시간 표준편차

$\alpha, \beta, \gamma, \zeta$: 파라미터

②구축결과

<표 부록-12> 단위거리당 통행시간 표준편차 모형 구축결과(2차함수, CI)

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	-0.400	0.009	-45.854	0.000
β	0.647	0.012	53.033	0.000
γ	-0.174	0.004	-42.071	0.000
ζ	0.207	0.004	49.743	0.000

R^2 : 0.284

5) 파워함수, 독립변수: Congestion Index

①모형 형태

$$\frac{\sigma}{L} = \alpha CI^{\beta} HR^{\gamma} \quad (\text{부록-5})$$

여기서,

- CI : 평균속도 통행시간/기준속도 통행시간
- L : 링크길이(km)
- HR : 중차량 비율
- σ : 링크 통행시간 표준편차
- α, β, γ : 파라미터

②구축결과

<표 부록-13> 단위거리당 통행시간 표준편차 모형 구축결과(파워함수, CI)

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	0.206	0.002	98.095	0.000
β	0.978	0.011	88.828	0.000
γ	0.276	0.007	38.928	0.000

R^2 : 0.228

6) 로그선형함수, 독립변수: Congestion Index

$$\frac{\sigma}{L} = \alpha + \beta \text{LOG}(CI) + \gamma \text{LOG}(HR) \quad (\text{부록-6})$$

여기서,

- CI : 평균속도 통행시간/기준속도 통행시간
- L : 링크길이(km)
- HR : 중차량 비율
- σ : 링크 통행시간 표준편차
- α, β, γ : 파라미터

②구축결과

<표 부록-14> 단위거리당 통행시간 표준편차 모형 구축결과(로그함수, CI)

구분	추정값	표준오차	t	유의확률
α	-0.751	0.003	-221.605	0.000
β	1.097	0.015	71.932	0.000
γ	0.214	0.006	37.155	0.066
R^2 : 0.125				

Abstract

Development of Travel Time Reliability Index Estimation Model for Uninterrupted Roads

Park, Chan-woon

Transportation Studies

Department of Environmental Planning

The Graduate School of Environmental Studies

Seoul National University

Travel Time Reliability(TTR) signifies the difference between the expected and the actual travel time. In other words, TTR is the conception that shows how a traveler can reach the destination on time, which also implies the variability and the uncertainty. TTR index is the significant numerical value that indicates the figure by quantifying the travel time reliability.

TTR index shows the variability of travel time to the destination in a certain transport environment. To analyze TTR, it is necessary to have individual traveler's behavior data. However the data has not been sufficient enough, so that the study has not been fully undertaken. Recently, the big data has provided various data that can lead to diverse studies including traveler's behavior data. This study used individual travel behavior data to establish the TTR index estimation model. It has not been long in studying the standard deviation through TTR index. In this study stream, it has built standard deviation model to estimate TTR. Also, it developed TTR index estimation model with South Korean drivers travel behavior data.

To build TTR index estimation model, it examined TTR index and the

independent variables. It comprehended significant variables by examining the relation of TTR index and independent variables. After a formation of an optimum estimation formula of TTR index independent variables and travel time standard deviation, it has formed the TTR index estimation model. It also provided an ideal model through the verification of TTR index estimation model. The data that has used in TTR index estimation model is not aggregated and it is possible to recognize individual vehicle speed.

Utilizing individual vehicle traffic speed, it estimated links average travel time and travel time standard deviation. This helped to establish TTR index estimation model. And also, by supplementing it, it examined the newly added independent variables. Independent variables are essential, which can affect TTR, but had not been studied in the literature. Therefore this study built TTR index estimation model reflecting the newly added independent variables.

This study suggests an adequate model that includes independent variables such as MD(Mean Delay), link length, heavy vehicle ratio, number of lanes. It examined various forms of TTR index estimation model, and also provided ideal formula in a quadric equation. It used View-T 1.0 individual travel behavior data and analyzed 8 representative motorways(uninterrupted road) in South Korea.

It has estimated individual parameter in a number of lanes after developing a quadric equation of TTR index estimation model. It was productive to use lanes as an independent variable in TTR index estimation model. However, it was the core problem how to apply in the model. It has concluded that it was adequate to build a model separately by dividing roads in 4 lanes, 6 lanes, and more than 8 lanes. It is plausible because of different features in each road.

This study also measured TTR cost. The values of TTR were computed using Reliability Ratio(RR) of 0.8 which is recommended by Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. TTR cost estimation analyzation has concluded that the more the road is congested, the higher the ratio of personal average cost. In addition, when the road gets congested, travel time cost and TTR cost goes higher than the other costs. In the aspect of cost analyzing, the social cost is higher than personal cost in TTR cost.

This study has showed the most accurate TTR through TTR index estimation model. The model, propopsed in this article, has promising potentialities for the estimation of travel time reliability for uninterrupted road sections (e.g., urban and regional motorway, regional roadways). In addition, the model provided in the study could be possible in applying road management evaluation index and road TTR benefits.

Keywords : Travel Time Reliability, Travel Time Standard Deviation, Mean Delay, Quadric Equation Model, Travel Time Reliability Index

Student Number : 2015-31309